

平成 21 年度
修士学位論文

信号処理による受聴者位置情報の検出

Detection of the Listener's Position
using Signal Processing

1125086 金井 宏一郎

指導教員 福本 昌弘

2010 年 3 月 1 日

高知工科大学大学院 工学研究科 基盤工学専攻
情報システム工学コース

要 旨

信号処理による受聴者位置情報の検出

金井 宏一郎

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、その手法として信号補正システムが挙げられる。音場再生は、出力した音を受聴点で正確に再現することを目的としており、出力した音を受聴点に届くまでに受ける影響を補正フィルタを用いて除去する。しかしながら、受聴者が移動する環境においては、正しく音場再生が行われないという問題がある。この問題については、受聴者の位置それぞれにおいて個別の補正フィルタ係数を与えることで解決する方法が考えられている。過去の研究において、音源信号と観測用マイクロフォンの入力信号を用い、相互相関と適応フィルタにより推定した伝達特性のフィルタ係数から受聴者の位置を検出する方法を提案している。その手法においては、利用する音源を限定した状態において、受聴者の位置検出が可能であることが確認されている。しかしながら、音声信号のような非定常な信号を用いた場合において、位置検出の失敗が確認されている。

本研究では、相互相関による位置検出の欠点を適応フィルタを用いることで補う手法を提案する。提案手法では、音源信号が小さい場合に起こる誤検出の対策として、相関係数が一定値以上である場合のみフィルタ係数の更新を行い、音声信号のような非定常な信号においても受聴者位置検出を可能にしている。提案手法による受聴者位置検出の性能評価により、音源が音声信号である場合においても、位置を特定するようなデバイスを用いることなく受聴者の位置検出が可能であることを確認している。

キーワード 位置検出, 相互相関, 適応フィルタ

Abstract

Detection of the Listener's Position using Signal Processing

Koichiro Kanai

In recent years, the sound field reproduction system has attracted much attention. This system aims to produce a sound field same to original one. The sound field reproduction can accurately recreate the output sound of speaker on the position of a listener. However, when the listener moves, the observation sound at the listener position is not properly performed. This problem is settled by giving the revision filter which is most suitable for position of the listener. This method is confirmed that the detection of listener's position is possible in the state that limited to a sound source signal. However, this method is confirmed that the detection of listener's position is impossible in voice signal.

In this paper, we proposed a detection method to supplement a weak point of cross correlation by using an adaptive filter. This method enables position search in the signal which is nonstationary such as a voice signal. By performance evaluation of suggestion technique, we confirmed that the listener's position can detect without the device which specifies a position. In addition, we confirmed that the proposed method is effective for nonstationary signal.

key words Position Detection, Cross Correlation, Adaptive Filter

目次

第 1 章	序論	1
1.1	背景と目的	1
1.2	構成	2
第 2 章	信号補正システム	3
2.1	はじめに	3
2.2	音響システム	3
2.3	逆特性の近似	5
2.4	信号補正システム	7
2.5	信号補正システムの問題点	8
2.6	まとめ	8
第 3 章	受聴者位置検出	9
3.1	はじめに	9
3.2	相互相関	9
3.3	音の伝達時間測定	11
3.4	適応フィルタ	12
3.5	音の伝達時間測定	14
3.6	受聴者位置の検出	14
3.7	計算機シミュレーションによる評価	17
3.7.1	室内伝達特性の測定	17
3.7.2	シミュレーション条件	17
3.7.3	シミュレーション結果（相互相関を用いた受聴者移動検出）	19
3.7.4	シミュレーション結果（適応フィルタを用いた受聴者移動検出）	19

目次

3.8	実験による評価	25
3.8.1	実験条件	25
3.8.2	実験結果	25
3.9	まとめ	26
第 4 章	組み合わせた手法	33
4.1	はじめに	33
4.2	これまでの提案手法の問題点	33
4.3	新たな手法の提案	33
4.3.1	問題点の改善策	34
4.3.2	新たな手法	35
4.4	実験	37
4.4.1	実験条件	37
4.4.2	実験結果	39
4.5	まとめ	40
第 5 章	結論	44
5.1	本研究のまとめ	44
5.2	今後の展開	44
	謝辞	46
	参考文献	47
付録 A	適応信号処理	48
A.1	パラメータ推定問題	48
A.2	適応アルゴリズム	48
A.3	学習同定法	49

目次

2.1	室内における音の伝搬	4
2.2	等価回路	5
2.3	室内伝達特性の補正	6
2.4	信号補正システム	7
3.1	受聴者移動検出法	11
3.2	適応フィルタを用いたシステム図	13
3.3	構成したフィルタからの伝達時間推定	13
3.4	受聴者位置の検出	15
3.5	音源と受聴者の配置	18
3.6	マイクロフォンの配置	19
3.7	中心地点のインパルス応答（左耳）	20
3.8	中心地点のインパルス応答（右耳）	21
3.9	後方 50cm 地点のインパルス応答（左耳）	21
3.10	後方 50cm 地点のインパルス応答（右耳）	22
3.11	音源信号（音声信号）	22
3.12	相互相関を用いた位置情報検出結果（白色雑音）	23
3.13	相互相関を用いた位置情報検出結果（音声信号）	23
3.14	適応フィルタを用いた位置情報検出結果（白色雑音）	24
3.15	適応フィルタを用いた位置情報検出結果（音声雑音）	24
3.16	入力信号	26
3.17	観測信号 (iea)	28
3.18	観測信号 (fed)	28
3.19	音源と受聴者の配置	29

図目次

3.20	位置情報検出結果 (heb)x 座標	29
3.21	位置情報検出結果 (heb)y 座標	30
3.22	位置情報検出結果 (fed)x 座標	30
3.23	位置情報検出結果 (fed)y 座標	31
3.24	位置情報検出結果 (iea)x 座標	31
3.25	位置情報検出結果 (iea)y 座標	32
4.1	相関値の変化	36
4.2	入力信号	38
4.3	観測信号 (iea)	39
4.4	位置情報検出結果 (heb)x 座標	40
4.5	位置情報検出結果 (heb)y 座標	41
4.6	位置情報検出結果 (fed)x 座標	41
4.7	位置情報検出結果 (fed)y 座標	42
4.8	位置情報検出結果 (iea)x 座標	42
4.9	位置情報検出結果 (iea)y 座標	43
5.1	音源が複数ある場合の受聴者位置検出	45

表目次

3.1	相関係数	10
3.2	インパルス応答の測定条件	17
3.3	相互相関のパラメータ	18
3.4	適応フィルタのパラメータ	18
3.5	受聴者の移動順序	27
3.6	相互相関のパラメータ	27
3.7	適応フィルタのパラメータ	27
4.1	受聴者の移動順序	38
4.2	相互相関のパラメータ	39
4.3	適応フィルタのパラメータ	39

第 1 章

序論

1.1 背景と目的

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、信号補正システムを用いた音場再生システムに関する研究が行われている [1, 2]. 音場再生は、出力した音を受聴点で正確に再現することを目的としており、出力した音を受聴点に届くまでに受ける影響を補正フィルタを用いて除去する. この信号補正システムでは、対象として指定した点のみ補正を行うように考慮されているが、受聴者が移動することにより正しく音場再生が行われないという問題がある. その解決策として、受聴者の移動に合わせて補正フィルタの再設定を行うことにより、常に受聴者点で正しく音場再生を行わせるという方法が提案されている [3]. 受聴者の移動検出を実現すれば、補正フィルタを再構成する目安にすることが可能である. また、移動検出だけでなく正確な位置情報を取得可能であれば、予め設計しておいたその位置に最適な補正フィルタを適用することができ、音場再現性能のさらなる向上が見込まれる. 過去の研究において、利用する音源を限定した状態において、受聴者の移動検出が可能であることが確認されている [4, 5]. しかしながら、音声信号のような非定常な信号を用いた場合において、位置検出の失敗が確認されている.

本研究では利用する音源に限定されない受聴者の位置検出法を提案する. 提案手法では、非定常な信号である音声信号を用いて実験を行い、受聴者の位置情報を取得できることを確認する.

1.2 構成

本論文は 5 章により構成されている．以下に各章の概要を述べる．

第 2 章では，信号補正システムにおける問題点について述べる．

第 3 章では，相互相関と適応フィルタそれぞれを用いた受聴者位置検出法について述べ，
計算機シミュレーションと実験により性能を評価する．

第 4 章では，以前の手法を改良した新たな手法について提案し，実験によりその性能を評価する．

第 5 章では，本論文の結論と今後の展開を述べる．

第 2 章

信号補正システム

2.1 はじめに

本章では，信号補正システムについて説明する．また，信号補正システムの問題点についても述べる．

2.2 音響システム

空間内の 2 点（音源と観測点）の音の伝わり方を表す関数を空間伝達関数 $G(z)$ という．空間が屋外などの自由空間である場合，空間伝達関数 $G(z)$ は音源から距離のみに依存する．これは，音圧が音源からの距離に反比例して減少する距離減衰特性と，その距離を音が伝搬するのに要する伝搬遅延時間を表すものとなっている．一方，音場が図 2.1 のように反射音を有する室内などの閉空間において，音源であるラウドスピーカと受音するマイクロホンを設置し，この 2 点間の音の伝達について考える．ここで，ラウドスピーカに入力した音を $x(t)$ ，マイクロホンで受音した信号を $y(t)$ とする．このとき，マイクロホンで観測される音 $y(t)$ には，音源から受音点に直接到達する音（直接音）と，壁面で反射された多数の反射音が含まれる．反射音は，マイクロホンで受音されるまでに壁面で反射された回数によって 1 次反射音，2 次反射音などに分類される．音の反射は，壁面の吸収などによって音のエネルギーが消滅してしまうまで多数回繰り返される．音源からパルス音を発生させたときにマイクロホンで受音される信号（インパルス応答）は，時間の経過と共にまず直接音が受音され，次に 1 次，2 次などの低次反射音が散発的に受音される．その後，続けて高次反射音が

2.2 音響システム

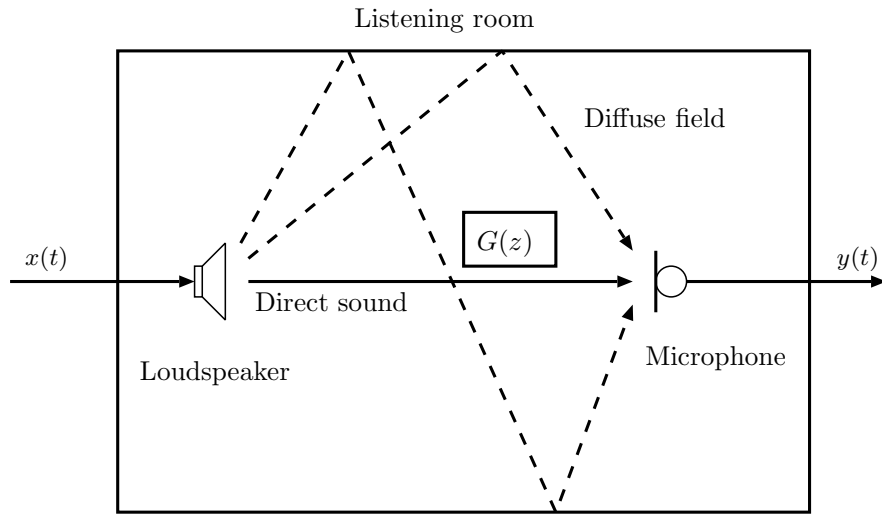


図 2.1 室内における音の伝搬

受音される．ここで，低次の反射音は単に初期反射音と呼ばれ，また高次の反射音はインパルス応答長が時間の経過と共に級数的に増加し，残響音と呼ばれる場合がある．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．室内伝達関数 $G(z)$ は，この離散数列を z 変換した次式により求められる．

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

音源，マイクロホン，空間音響伝達系による影響はすべて線形であると仮定すると， $x(t)$ と $y(t)$ 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 $x(n)$ に対する応答 $y(t)$ が求められることを意味している．式 (2.2) の両辺を z 変換すると，次式のよ

2.3 逆特性の近似

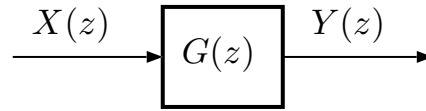


図 2.2 等価回路

うに変形される.

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

ただし, $X(z)$, $Y(z)$ はそれぞれ $x(t)$, $y(t)$ の z 変換を意味する. 式 (2.3) の関係より, 図 2.1 の音響伝達系は図のような等価回路で表される. このように, 室内音場における音響の入出力システムは, 線形系としてモデル化することができる.

2.3 逆特性の近似

トランスオーラル系の音場再生システムでは, ラウドスピーカに入力される所望信号と受音点での観測信号を等しくするように制御することを目的とする. つまり, 図 2.2 に示す線形モデルを想定した場合, $X(z) = Y(z)$ となるように制御しなければならない. しかし実際の音場においては, 受音点で観測される音は式 2.3 に示したように伝達特性 $G(z)$ の影響を受けるため, この影響を補正する必要がある. このような影響を $D(z)$ から除去し, $X(z)$ を復元するために, 図 2.3 に示すように補正フィルタ $C(z)$ を用いる. ここで, 補正フィルタとは空間伝達特性の逆特性に近似したフィルタである. 今, この補正フィルタ $C(z)$ 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,

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

2.3 逆特性の近似

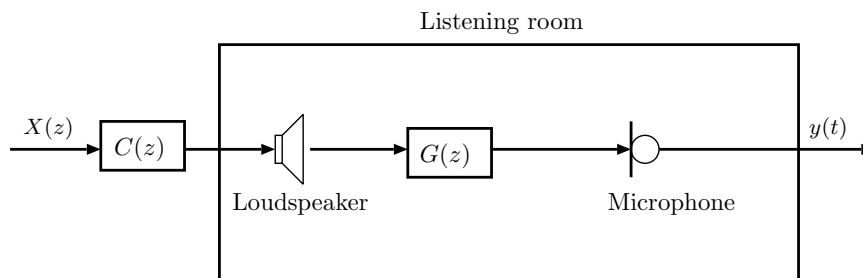


図 2.3 室内伝達特性の補正

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によって

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

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ことになる．ただしこのような関係が成り立つためには，伝達関数 $G(z)$ が最小位相系を示す（ $G(z)$ に対するすべての零点が単位円内に含まれる）必要がある．しかしながら，一般の室内においてはその多くが非最小位相系であることが知られており，正確な逆特性を推定することは極めて困難であるため，式 2.5 のような関係は実現できない．

非最小位相系に対する逆特性を実現するための方法として，安定性が保証されている FIR フィルタを用いて伝達特性の逆特性を近似的に求める方法が提案されている．代表的な手法として，逆特性の誤差エネルギーを最小にする FIR フィルタで近似する方法が挙げられる．これは

2.4 信号補正システム

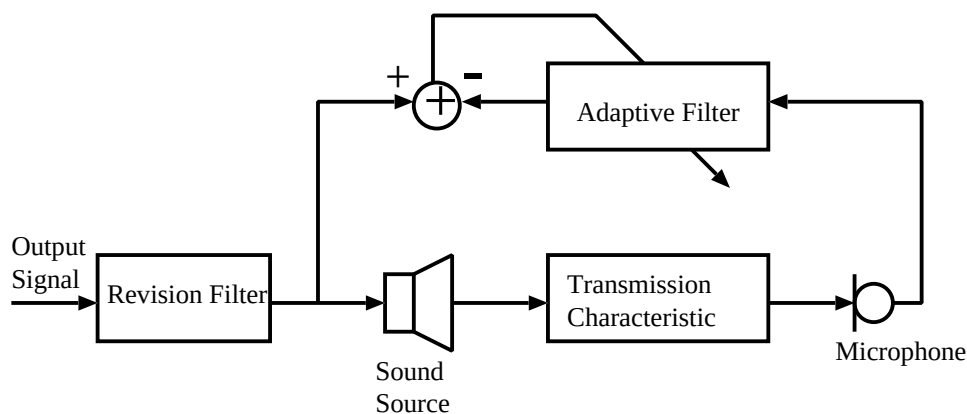


図 2.4 信号補正システム

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

で与えられる誤差 $E(z)$ のエネルギー ($E(z)$ の 2 乗) を最小とする $C(z)$ の探索問題に帰着する. $G(z)$ が非最小位相系である場合, そのまま $G(z)$ の逆特性 $1/(G(z))$ を近似すると, 因果性や安定性を満たさないフィルタとして設計されるため, フィルタを安定化させるように様々な工夫がされている. 具体的には不要となる零点を除去したり, 遅延や雑音を付加することが提案されている.

2.4 信号補正システム

一般的な 1 チャンネル信号補正システムの構成を図 2.4 に示す. このシステムでは, 受聴点での観測音をフィードバックし, 音源から受聴者に伝わる間に受ける影響を打ち消す補正フィルタを構築し, 補正フィルタを通した信号をスピーカから再生することにより, 受聴点で正しい音場再生を行うことを可能とする [6, 7]. この補正フィルタの構成には適応フィルタを用いており, 再生空間の影響を補正する補正フィルタの構成を自動的に行う.

2.5 信号補正システムの問題点

信号補正システムでは，受聴者が移動した場合，補正フィルタの再構築が完了するまでの間，原音再生の性能が劣化する．なぜなら，受聴者が移動するまでの補正フィルタは，移動前の受聴者の位置で原音再生を行うよう構築されているためである．この対策として，受聴者の位置を RFID 等の位置を特定するデバイスを利用することにより取得し，予め計算しておいた各場所における補正フィルタを切り替える方法がある．この方法を用いると，受聴者のそれぞれの位置に最適な補正フィルタを素早く適用することができ，音場再生性能の向上が見込まれる．しかしながら，位置を特定するこのような機器を容易に利用できるとはいえない．そこで，特別な機器も用いず容易に受聴者の移動及び位置情報を得ることができる仕組みが必要となってくる．

2.6 まとめ

本章では，信号補正システムについて説明し，その問題点を提示した．

第 3 章

受聴者位置検出

3.1 はじめに

本章では、信号補正システムでの問題点である受聴者移動時における音場再生性能劣化に対する解決策として、相互相関および適応フィルタによる受聴者移動検出の手法について述べる。この手法を用いることにより、受聴者の位置情報を得ることができ、その位置に最適な補正フィルタを与えることができるようになる。計算機シミュレーションと実験により提案した手法の位置検出性能の評価を行い、本手法の問題点を提示する。

3.2 相互相関

2つの信号の類似性を時間の遅延に関係なく評価する場合、2つの信号が時間的にどれくらい遅延しているかを知る際に利用される評価尺度が相互相関係数である [8]。受聴点での観測音を、それぞれ $f = \{f_0, f_1, \dots, f_{N-1}\}$, $g = \{g_0, g_1, \dots, g_{N-1}\}$ とするとき、その相互相関係数 $\tilde{R}_n^{(fg)}$ は、

$$\tilde{R}_n^{(fg)} = \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} f_i g_{i+n}}{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} f_i^2} \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} g_{i+n}^2}} \quad (3.1)$$

と定義される。この式は、信号 f の時間軸はそのままにしておいて、信号 g のみを n サンプル進めて得られる信号、つまり

$$g^n = \{g_{0+n}, g_{1+n}, \dots, g_{N-1+n}\} \quad (3.2)$$

3.2 相互相関

との内積を計算している．式 (3.2) において， $g_i = g_{i+N}$ と N サンプル毎の周期性を持っていることを考慮した場合，式 (3.1) は次のように変形される．

$$\tilde{R}_n^{(fg)} = \frac{\sum_{i=0}^{N-1} f_i g_{i+n}}{\sqrt{\sum_{i=0}^{N-1} f_i^2} \sqrt{\sum_{i=0}^{N-1} g_i^2}} \quad (3.3)$$

また，あらかじめ信号の平均値を差し引くことにより，直流成分を取り除くことができ，変化分に着目した相関を調べることが可能である．この時の相互相関係数を $\hat{R}_n^{(fg)}$ と表すと，

$$\begin{aligned} \hat{R}_n^{(fg)} &= \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} \hat{f}_i \hat{g}_{i+n}}{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} \hat{f}_i^2} \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} \hat{g}_i^2}} \\ &= \frac{\sum_{i=0}^{N-1} \hat{f}_i \hat{g}_{i+n}}{\sqrt{\sum_{i=0}^{N-1} \hat{f}_i^2} \sqrt{\sum_{i=0}^{N-1} \hat{g}_i^2}} \end{aligned} \quad (3.4)$$

のようになる．求まった $\hat{R}_n^{(fg)}$ が 1.0 に近いほど，信号 f と g の類似度が高い状態であるといえる．つまり，観測地点での左右耳で受音した音に時間的な遅延がない状態である．

相関係数は，2 変数の規則的な関係を表している．表 3.1 に，その関係を示す．相関係数の値が大きいほど，強い相関があることを示す．逆に，相関係数の値が 0 に近ければ，ほとんど相関が無いことを示す．よって，求まった $\hat{R}_n^{(fg)}$ が 1.0 に近いほど，信号 f と g の類似度が高い状態であるといえる．つまり，観測地点での左右耳で受音した音に時間的な遅延がない状態である．

表 3.1 相関係数

$0.0 \leq \ r\ \leq 0.2$	ほとんど相関がない
$0.2 < \ r\ \leq 0.4$	弱い相関がある
$0.4 < \ r\ \leq 0.7$	中程度の相関がある
$0.7 < \ r\ \leq 1.0$	強い相関がある

3.3 音の伝達時間測定

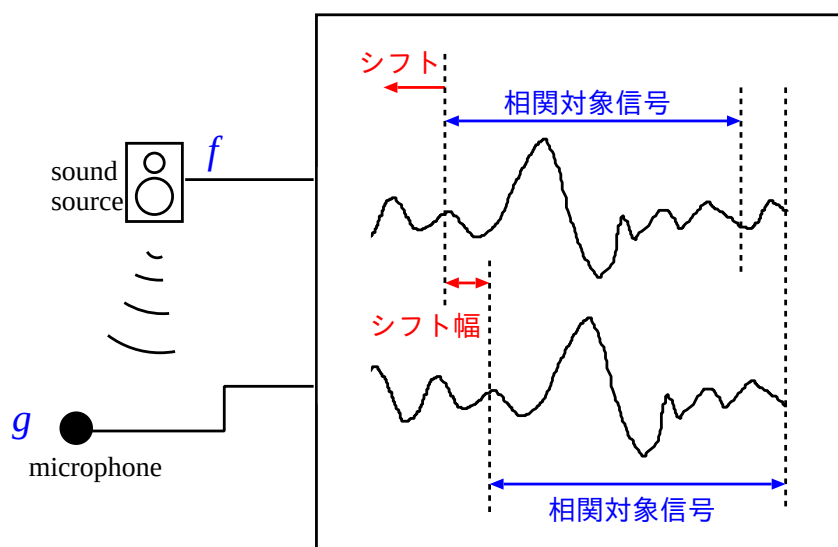


図 3.1 受聴者移動検出法

3.3 音の伝達時間測定

提案システムの概略を図 3.1 に示す．受聴者移動の検出には，受聴点での観測音と音源信号を用いる．現時刻から過去 M サンプルの音源信号と観測信号を相関対象サンプルとする．2 つの入力信号の相互相関値を一方の信号を 1 サンプルずつ時間軸上で過去の方へシフトしながら算出していく，相関値が最大になった際のシフト幅を記録していく．シフトさせていく中で最も相関値が大きくなった地点は，2 つの信号が類似しているということであり，その際のシフト幅は信号が何サンプル遅延しているのかを示しているといえる．よって，音源から観測点までに音が伝わる時間を求めることが可能である．

前後方向の移動については，音源であるラウドスピーカから再生する音とマイクロフォンでの観測音との相互相関を用いる．音源と観測音の相関は，音が受聴者に伝わるまでの空間の影響を受けるため，観測音間の相関値に比べて小さな値になりがちであるが，最も相関値が大きくなった際のシフト幅を位相ずれと判断する．音源の信号はそのまま，観測音の信号を 1 サンプルずつシフトしながら相関をとる．このシフト幅は，音源から受聴者に音が伝わる時間を示しており，またその距離を求めることも可能である．受聴者が音源から離れるにつれて，このシフト幅は大きくなっていく．シフト幅は提案システムに入力する信号のサ

3.4 適応フィルタ

サンプリング周波数により異なってくる。サンプリング間隔が長い場合は、シフト幅の算出値が小さくなるため、移動の検出精度が低下する。

本手法では、求まったシフト幅の変化から受聴者の移動を検出する。システムで扱う信号のサンプリング周波数を 44,100Hz と考えた場合、1 秒間に 44,100 サンプルのデータが存在し、そのデータがシステムに入力されることとなる。よって、50cm 後方への移動させた場合の前後移動検出のシフト幅は、およそ 65 サンプルの変化となる。10cm 移動する毎におよそ 13 サンプルの変化が見られるということになる。また、前方に 10cm 移動した場合はマイナス方向に 13 サンプル、後方に 10cm 移動した場合はプラス方向におよそ 13 サンプル変化する。ただし、これは部屋の壁による音の反響等を考慮していない場合のものであり、測定する空間によってシフト幅の変化が異なる。

この処理を音源から左耳、音源から右耳それぞれについて同様に行い、音の伝達時間を測定する。

3.4 適応フィルタ

空間を通り受聴者に届く音は環境の影響を受けるため、原信号とは異なった信号を受聴者は観測することとなる。また、音源から受聴者までの空間伝達特性は未知である。この空間伝達特性は、適応フィルタにより算出することが可能である。適応フィルタでは、式 (3.5) で示す学習同定法アルゴリズムを用いてフィルタを構成する [9]。

$$h_N(t+1) = h_N(t) + \alpha \frac{x_N(t)}{\|x_N(t)\|^2} e(t) \quad (3.5)$$

本研究では、受聴者の位置情報を取得することが目的であるため、音源から空間に放たれた音が最初に観測されるまでの時間を知る必要がある。構成されたフィルタから、音源から受聴者に届くまでに要する時間を推定することは容易である。フィルタ係数が最大値をとる地点が、音源から受聴者へ最初に到達するまでの時間であると推定することができるためである。

原信号と観測音の相互相関を取る場合、周りの環境の影響を受けやすいため、おのずと相

3.5 音の伝達時間測定

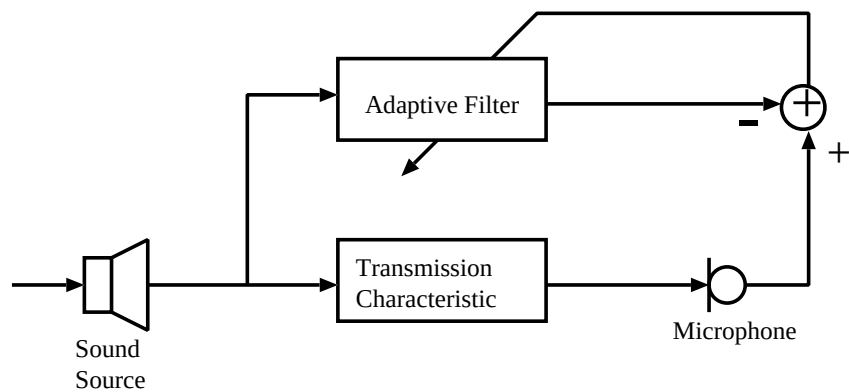


図 3.2 適応フィルタを用いたシステム図

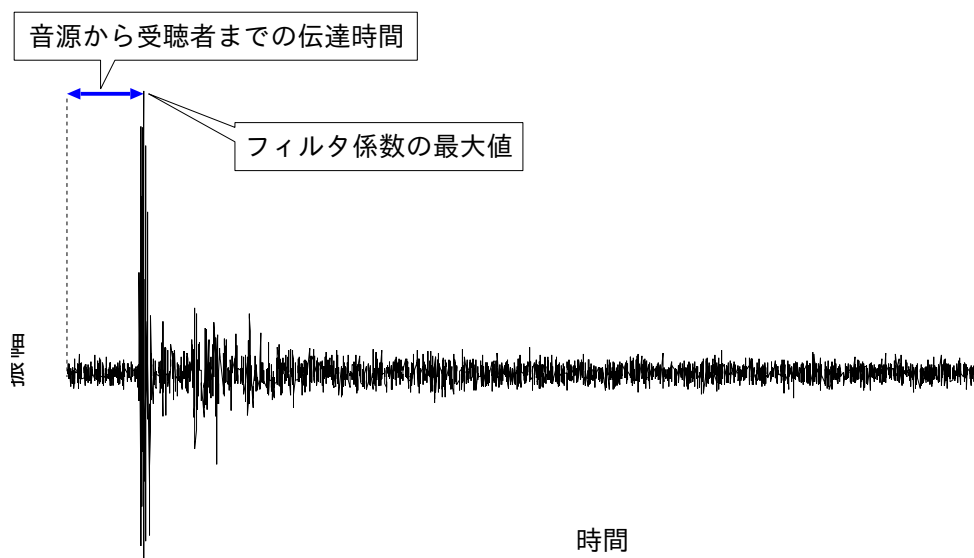


図 3.3 構成したフィルタからの伝達時間推定

閾値は小さくなる．そのため，この情報を音源から受聴者までの距離を推定するために利用することは誤判定に繋がりがねない．適応フィルタにより構成されたフィルタを利用すれば，最初に直接音が受聴者に届くと考えられるため，壁からの反射音など悪条件である場合に対しても効果的であるといえる．

3.5 音の伝達時間測定

適応フィルタを用いた受聴者位置の検出では、適応フィルタにより構成したフィルタを用いる。音源から受聴者までの未知である伝達特性の推定を推定する方法を、図 3.2 に示す。適応フィルタの入力は音源信号とし、適応フィルタの出力信号と観測音の誤差をとる。推定系では、常に音源と受聴者間の伝達特性を推定しているため、受聴者が移動した際に推定系フィルタも更新される。よって、この伝達特性から音源から受聴者に音が伝わる時間を導き出すことが可能である。

音源から受聴者までの伝達時間を算出する手法を、図 3.3 に示す。適応フィルタにより構成されたフィルタの係数に着目すると、時間軸上を走査していき最も値が大きい値をとる地点が、音源から受聴者への音の伝達時間であると推定できる。音源から受聴者に音が伝わる時間を求めることが可能であれば、その距離を求めることも可能である。適応フィルタは常に学習を続けているため、常に音源と受聴者間の伝達特性を推定することができ、受聴者の移動する場合においても、再学習により対応することが可能となる。

この処理を音源から左耳、音源から右耳それぞれについて同様に行い、音の伝達時間を測定する。

3.6 受聴者位置の検出

ここでは、受聴者位置の検出方法について説明する。受聴者の位置検出には、左右それぞれの耳までの音の到着時間を利用する。この音の到着時間は、前章で説明した相互相関と適応フィルタそれぞれを用いた場合による左右それぞれの耳元までの音の到着時間である。

音源であるスピーカと受聴者の左右それぞれのマイクロフォンを繋いでできる三角形を図 3.4 に示している。ここでは、サンプリングを周波数 f は 44100Hz とし、三角形の辺はサンプルで表すものとする。頂点 K は音源、 M は左マイクロフォン、 L は右マイクロフォンを示している。また、辺 a は、受聴者の左右マイクロフォンの間隔を示している。 N は、2つのマイクロフォンを繋いだ直線の延長線と、音源からの垂線を下ろした際に交わる点であ

3.6 受聴者位置の検出

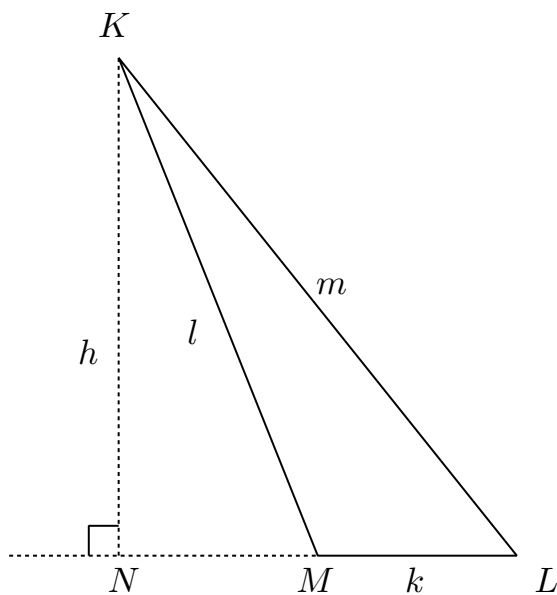


図 3.4 受聴者位置の検出

る．この三角形 KML を考えると，3 辺の長さがわかっていることから L の角度を求めることが可能である．

$$s = \frac{k + l + m}{2} \quad (3.6)$$

三角形の面積 S は

$$S = \sqrt{s(s - k)(s - l)(s - m)} \quad (3.7)$$

により求まる．三角形の高さ h は

$$h = \frac{2S}{k} \quad (3.8)$$

により求まる．三角形の角 L は

$$L = \sin^{-1} \frac{h}{m} \quad (3.9)$$

により求まる．よって，以下の式により辺 LN の長さを求めることは容易である．

$$LN = m \cos L \quad (3.10)$$

3.6 受聴者位置の検出

この辺 LN は、中心から受聴者の右マイクロフォンまでの距離を表している。しかし、この距離は受聴者の頭の中心を表しているわけではないため、 LN の長さから $k/2$ を差し引いた距離

$$m \cos L - \frac{1}{2}k \quad (3.11)$$

で受聴者の左右方向の位置を検出することができる。しかし、この値は距離ではなく伝達時間のサンプル表示であるため、音速 a を 340m/秒と考えると

$$\frac{a}{f}(m \cos L - \frac{1}{2}k) \quad (3.12)$$

により、単位を距離 (m) に変換することができ受聴者地点を検出することができる。

この距離の変化を見ることにより、左右の移動を検出することが可能となる。距離が大きくなるにつれて、受聴者は中心地点から離れていっていると推測することができる。

ここまでは、受聴者が中心地点より右側にいる場合を説明したが、左側にいる場合についても同様に受聴者位置検出は可能である。右側、左側にいるという判別については、図 3.4 を見ればわかるが、 m が l より長ければ右側、その逆であれば左側にいると判別することができる。よって、中心より左側にいる場合はマイナス、右側にいる場合はプラスの値を出力するようにした。

y 軸方向、つまり前後方向の位置については式 (3.8) により求めた辺 h が当てはまる。ここで、辺 h を長さ (cm) に変換すると y 軸方向の位置は

$$\frac{a}{f}h \quad (3.13)$$

で表すことができる。よって、受聴者地点の座標は

$$(\frac{a}{f}(m \cos L - \frac{1}{2}k), \frac{a}{f}h) \quad (3.14)$$

で表すことができる。ここで断っておくが、図 3.4 を見たらわかるように、受聴者が音源がある側に平行して 2 つのマイクロフォンが配置されておかなければ、誤った位置検出結果が現れることになる。よって本研究では、受聴者の頭の回転については考慮しないものとしている。

3.7 計算機シミュレーションによる評価

計算機シミュレーションにより，提案した 2 種類の受聴者移動検出法の評価を行う．

3.7.1 室内伝達特性の測定

研究室 (A259) の輪講スペースにおいて，室内伝達特性の測定を行った．ラウドスピーカ，受聴者の配置を図 3.5 に示す．受聴者にはダミーヘッドを用い，図 3.6 のように 2 つのマイクロフォンを設置する．インパルス応答の測定条件を表 3.2 に示す．測定方法として，ラウドスピーカに入力する白色雑音とマイクロホンで集音した観測信号から最小 2 乗法を用いてインパルス応答を測定した．図 3.5 に示した各位置においてそれぞれ測定を行った．測定したインパルス応答については，移動前を図 3.7, 3.8 に，移動後を図 3.9, 3.10 に示す．

表 3.2 インパルス応答の測定条件

インパルス応答長	4,096 点
入力信号	白色雑音
サンプリング周波数	44,100Hz
量子化ビット数	16bit

3.7.2 シミュレーション条件

原音である所望信号 $x_i(t)$ として，白色雑音と高知工科大学の学生歌「FlyingFish」の頭出し 20 秒間の 2 種類をそれぞれ与える．図にシミュレーションで用いた原信号を示す．また，適応フィルタのインパルス応答長は L は 4,000, 2,000, 1,000 の 3 種類，想定する空間の伝達関数は測定したインパルス応答を用い，ステップゲインは 1.0 とする．受聴者の配置については，図 3.5 に示している．

最初の 10 秒間は中心に配置し，10 秒後に 50cm 離れた別の地点に移動させるようにし，移動検出性能の評価を行う．本シミュレーションでは，前後方向，左右方向それぞれの移動

3.7 計算機シミュレーションによる評価

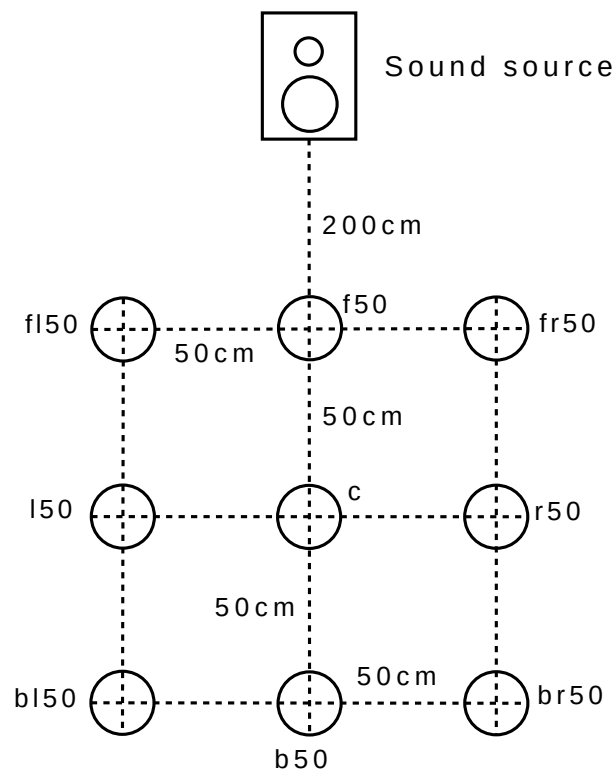


図 3.5 音源と受聴者の配置

をシミュレーションする。

表 3.3 相互相関のパラメータ

相関対象サンプル数	11,025, 22,050, 44,100 サンプル
オーバーラップ	4,410 サンプル
シフト幅	1,000 サンプル

表 3.4 適応フィルタのパラメータ

フィルタ長	1,000, 2,000, 4,000 サンプル
ステップゲイン	1.0

3.7 計算機シミュレーションによる評価

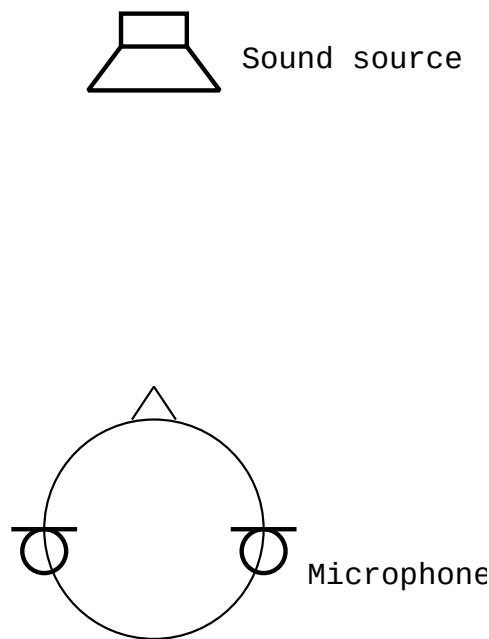


図 3.6 マイクロフォンの配置

3.7.3 シミュレーション結果（相互相関を用いた受聴者移動検出）

白色雑音を音源信号とした場合の相互相関を用いた受聴者位置情報の検出結果を図 3.12 に示す。また、音声信号を音源信号とした場合の相互相関を用いた受聴者位置情報の検出結果を図 3.13 に示す。

x 軸は時間（サンプル数）， y 軸は受聴者までの音の伝達時間（サンプル数）を示している。 y 軸方向の値が大きくなると、受聴者は後方へ移動していると推定することができる。

3.7.4 シミュレーション結果（適応フィルタを用いた受聴者移動検出）

白色雑音を音源信号とした場合の適応フィルタを用いた受聴者位置情報の検出結果を図 3.14 に示す。また、音声信号を音源信号とした場合の適応フィルタを用いた受聴者位置情報の検出結果を図 3.15 に示す。

白色雑音を音源信号とした場合においては、相互相関と適応フィルタを利用した方法それぞれにおいて音源から受聴者地点までの伝達時間が検出できているといえる。しかしながら、音声信号を音源信号とした場合においては、相互相関では誤った検出が多く見られ、適

3.7 計算機シミュレーションによる評価

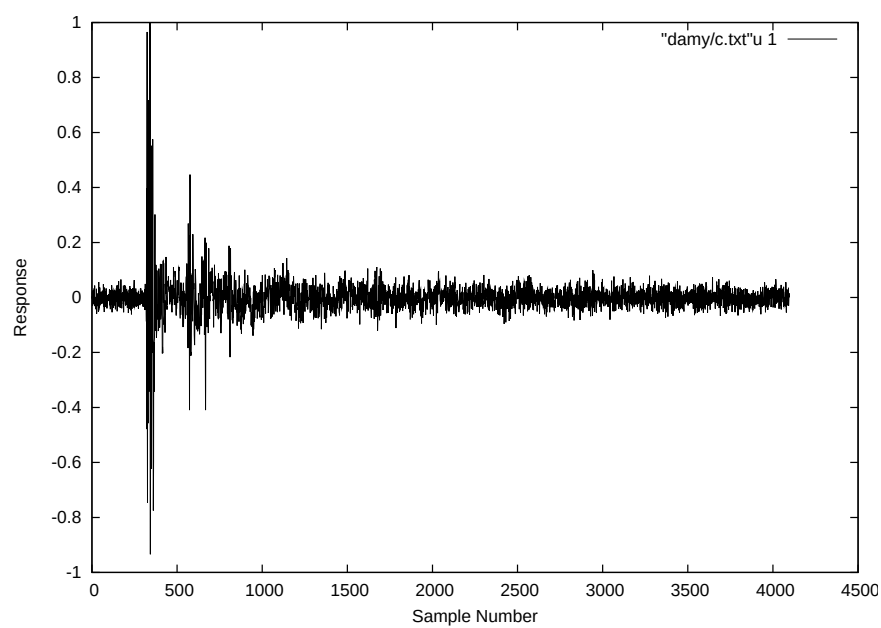


図 3.7 中心地点のインパルス応答（左耳）

応フィルタを用いた場合においては受聴者移動直後において誤った検出結果が連続して続いていることが確認できる。

3.7 計算機シミュレーションによる評価

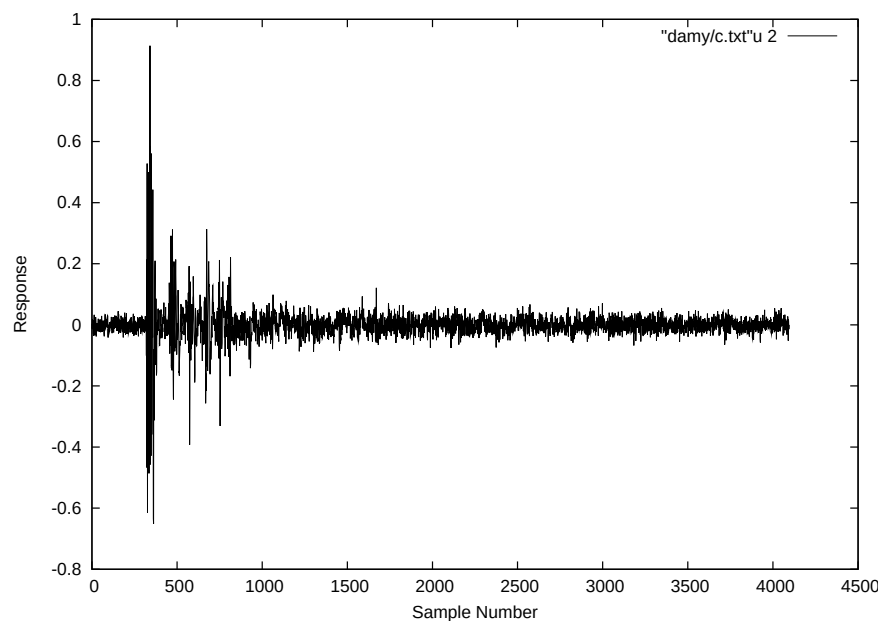


図 3.8 中心地点のインパルス応答（右耳）

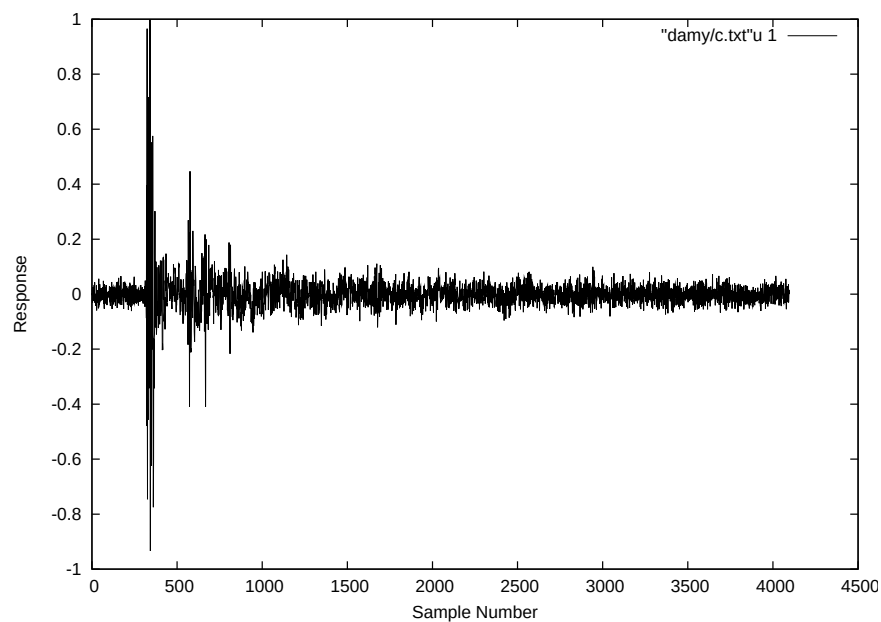


図 3.9 後方 50cm 地点のインパルス応答（左耳）

3.7 計算機シミュレーションによる評価

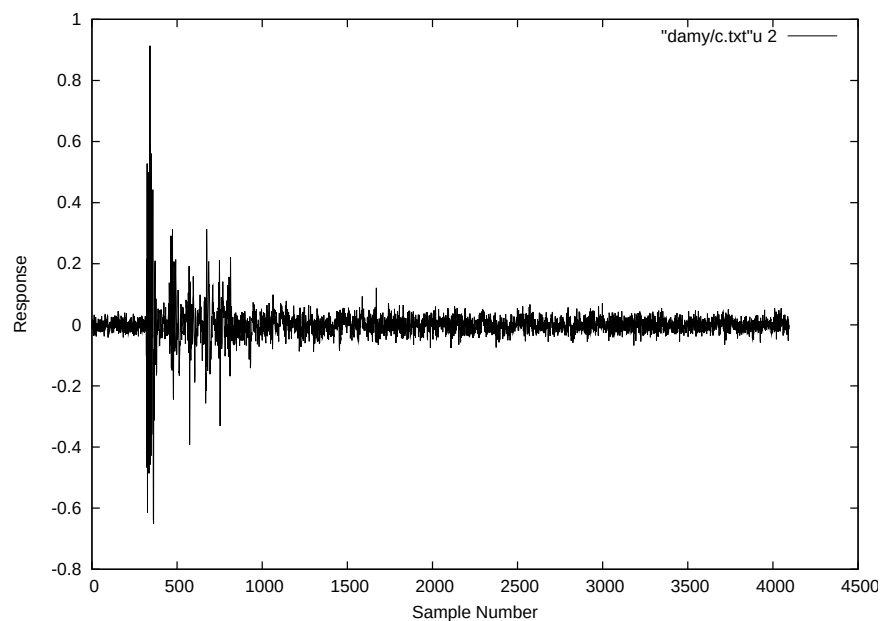


図 3.10 後方 50cm 地点のインパルス応答（右耳）

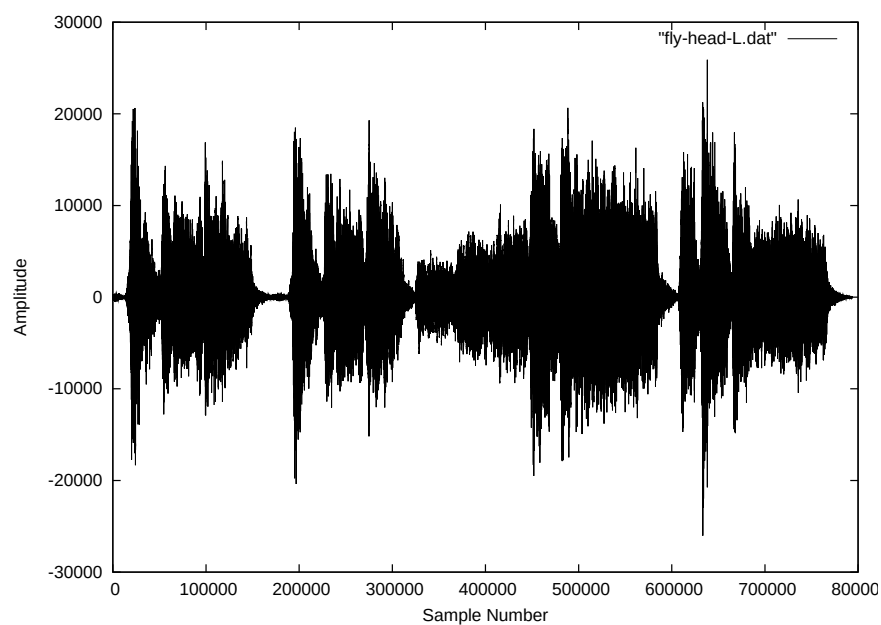


図 3.11 音源信号（音声信号）

3.7 計算機シミュレーションによる評価

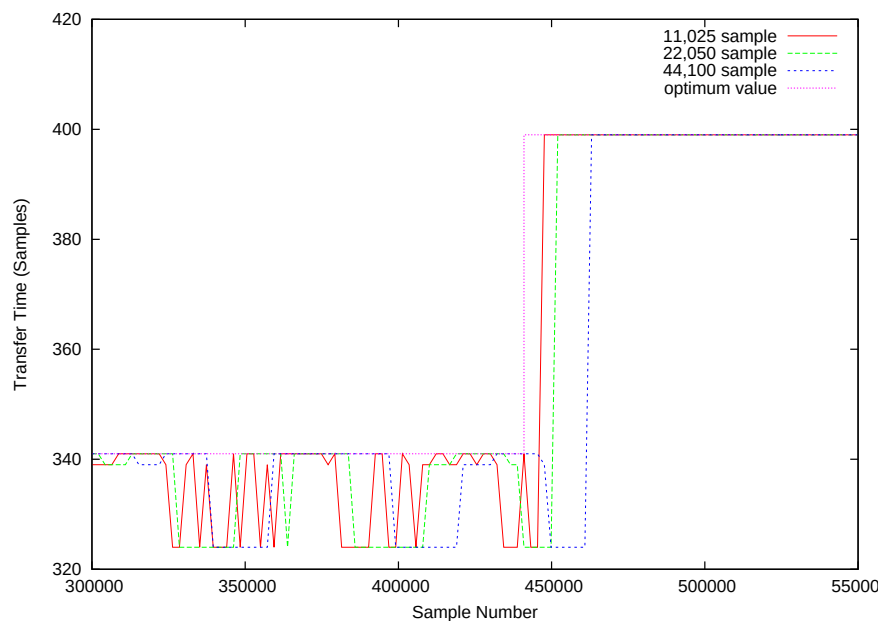


図 3.12 相互相関を用いた位置情報検出結果（白色雑音）

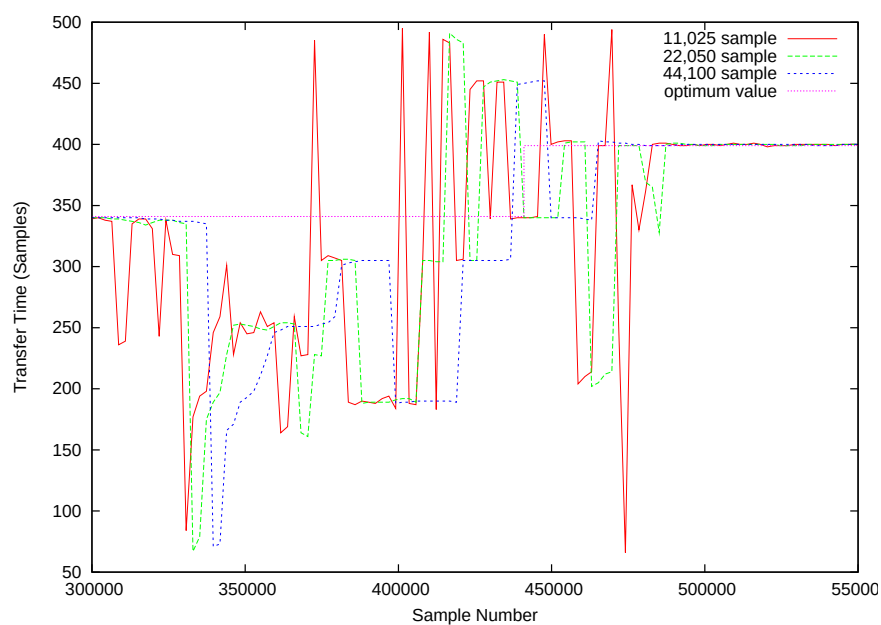


図 3.13 相互相関を用いた位置情報検出結果（音声信号）

3.7 計算機シミュレーションによる評価

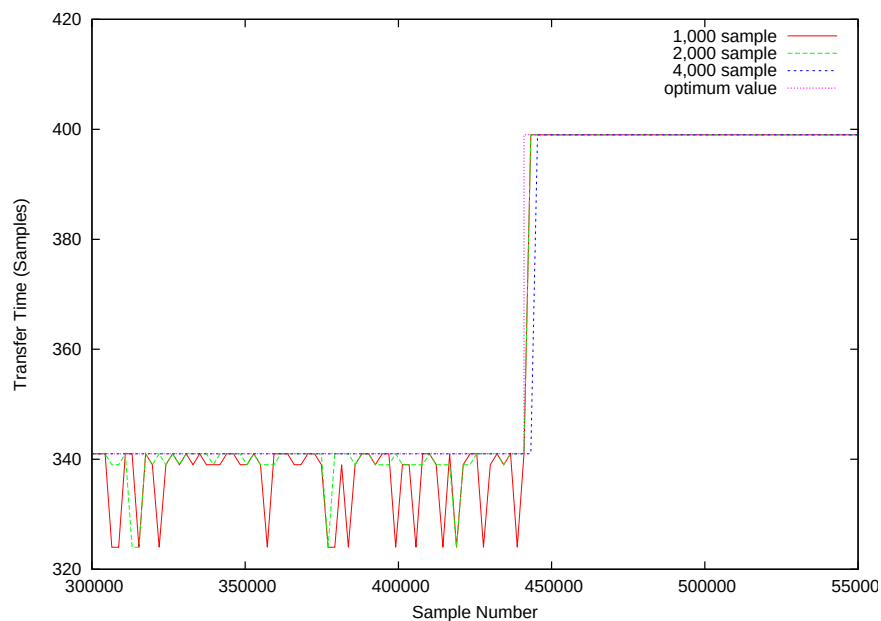


図 3.14 適応フィルタを用いた位置情報検出結果（白色雑音）

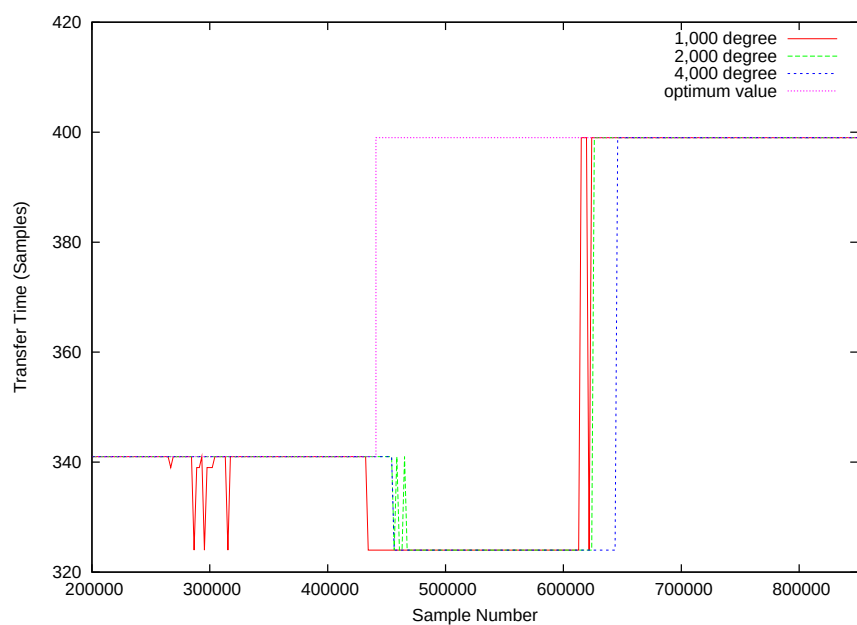


図 3.15 適応フィルタを用いた位置情報検出結果（音声雑音）

3.8 実験による評価

実験により，提案した 2 種類の受聴者移動検出法の評価を行う．

3.8.1 実験条件

音源にラウドスピーカ，受聴者は人間の顔を模したダミーヘッドを用いる．このダミーヘッドには，左右の耳部分にコンデンサマイクが埋め込まれている．音源信号には，図 3.16 に示すサンプリング周波数 44.1kHz の音声信号を用いる．音源と受聴者の配置については図 3.19 に示す．受聴者の移動順序については，表 3.5 に示す．受聴者の移動方法については，人がマイクスタンドに付いたダミーヘッドを手動で移動させるようにする．開始地点から中間地点へゆっくり移動した後，3 秒程度その場を動かずその後に最終地点へとゆっくり移動させるようにする．本実験では，後方へ移動する際は音源側を向いたままバックすることを想定している．また，斜め移動においては常に音源方向を向いて移動させるようにしている．本実験においては，受聴者が音源であるラウドスピーカの後方へ移動することは考慮しないものとする．

相互相関のパラメータ設定を表 3.6 に，適応フィルタのパラメータ設定を表 3.7 に示す．本実験でのパラメータ設定においては，受聴者の前後方向の移動距離を最大 385cm と考えている．これ以上の移動に対応させるにはシフト幅およびフィルタ長を大きくする必要がある．この条件で，相互相関を用いた手法と適応フィルタを用いた手法それぞれの移動検出性能の評価を行う．

3.8.2 実験結果

受聴者の観測信号を図 3.18 に示す．位置検出結果は，x 軸方向の座標と y 軸方向の座標それぞれを別々にグラフにして表している．x 軸方向の位置検出結果は，マイナスからプラスの値で表現されており，マイナスの値は音源に向かって左方向を示している．また，0 は受聴者が音源の真正面にいることを表す．一方，y 軸方向の位置検出結果はプラスの値のみ

3.9 まとめ

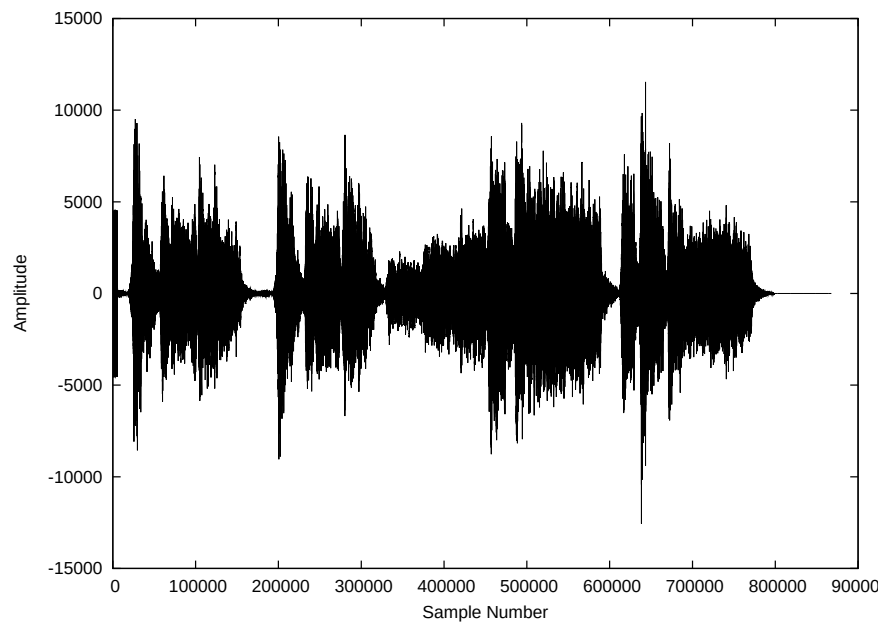


図 3.16 入力信号

で表現され、音源から離れるにつれてこの値は大きくなっていく。

受聴者を前後方向に移動させた際の位置検出結果を図 3.20, 3.21 に示す。受聴者は、3 つの地点を移動しているが、位置検出結果においても 3 箇所検出結果の値に変動がない地点を確認できる。受聴者を左右方向に移動させた際の移動検出結果を図 3.22, 3.23 に示す。受聴者を斜め方向に移動させた際の移動検出結果を図 3.24, 3.25 に示す。

受聴者が移動している最中においては、位置検出結果に誤りが多く見受けられる。これは、受聴者が移動中に足音等による音源信号以外の音がマイクロフォンにより観測されることによるものであると考えられる。しかしながら、移動後においては良好な位置情報検出結果が算出されているといえる。よって、受聴者の移動中における位置情報検出精度の向上が望まれると考えられる。

3.9 まとめ

本章では、相互相関及び適応フィルタそれぞれを用いた受聴者位置検出法を提案し、計算機シミュレーションと実験により位置検出性能の評価を行った。

3.9 まとめ

表 3.5 受聴者の移動順序

前後	$a \rightarrow d \rightarrow g$
	$h \rightarrow e \rightarrow b$
	$c \rightarrow f \rightarrow i$
左右	$a \rightarrow b \rightarrow c$
	$f \rightarrow e \rightarrow d$
	$g \rightarrow h \rightarrow i$
斜め	$g \rightarrow e \rightarrow c$
	$i \rightarrow e \rightarrow a$
	$c \rightarrow e \rightarrow g$

表 3.6 相互相関のパラメータ

相関対象サンプル数	8,820 サンプル
オーバーラップ	4,410 サンプル
シフト幅	500 サンプル

表 3.7 適応フィルタのパラメータ

フィルタ長	500
ステップゲイン	0.5

3.9 まとめ

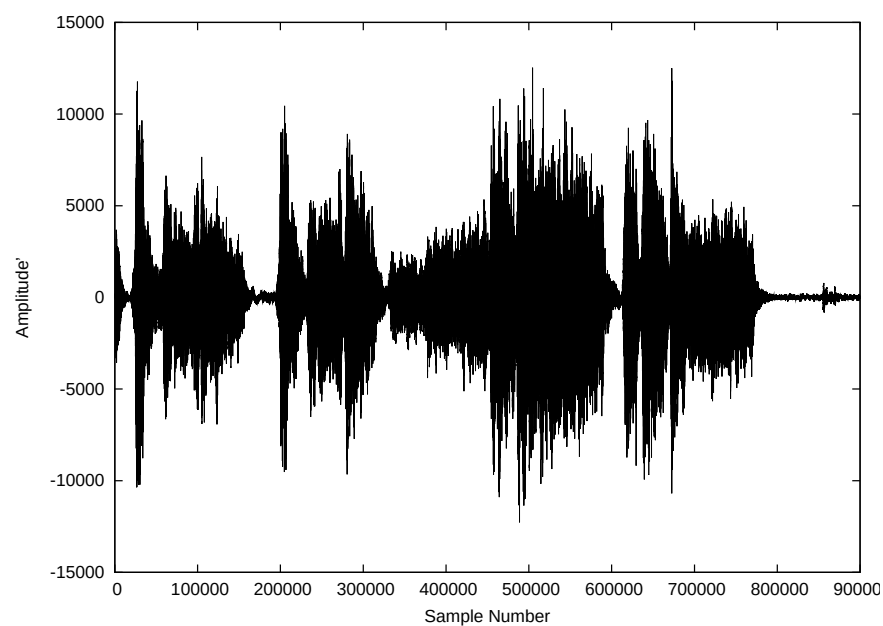


図 3.17 観測信号 (iea)

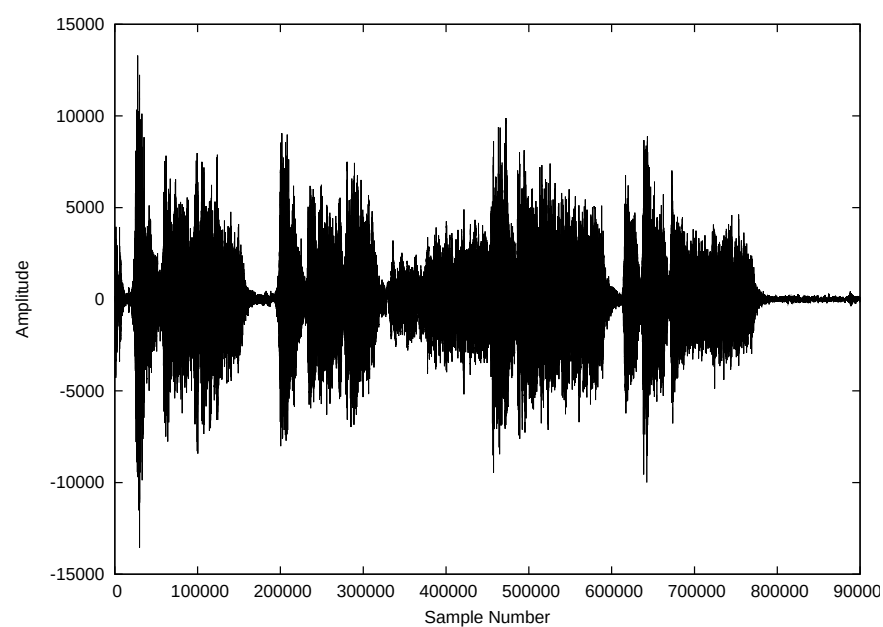


図 3.18 観測信号 (fed)

3.9 まとめ

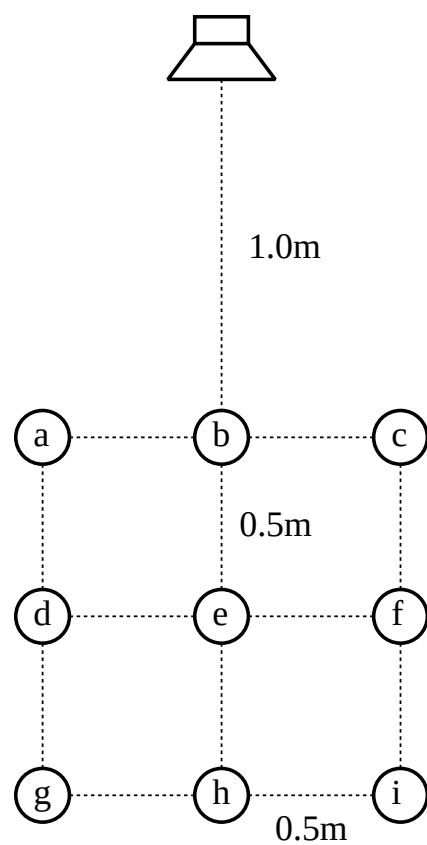


図 3.19 音源と受聴者の配置

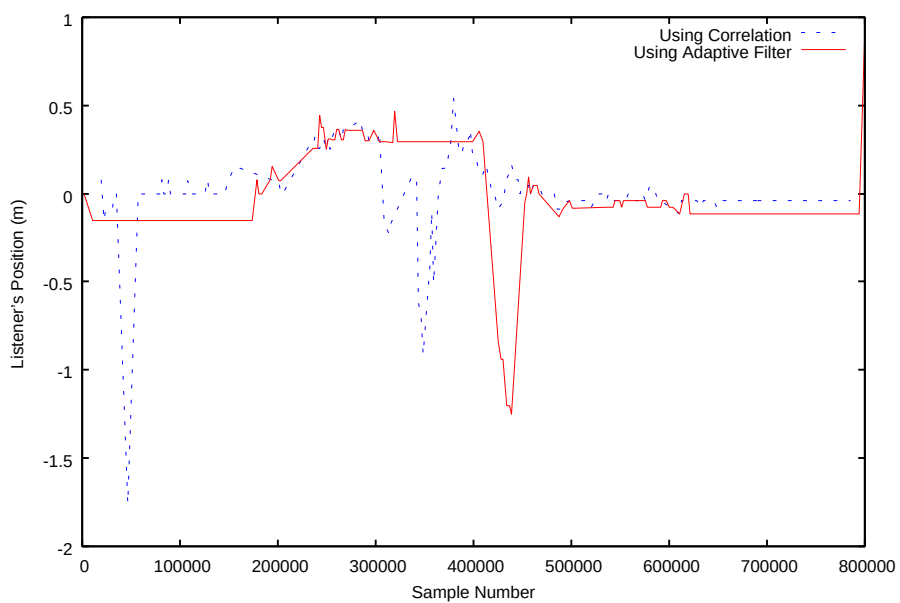


図 3.20 位置情報検出結果 (heb)x 座標

3.9 まとめ

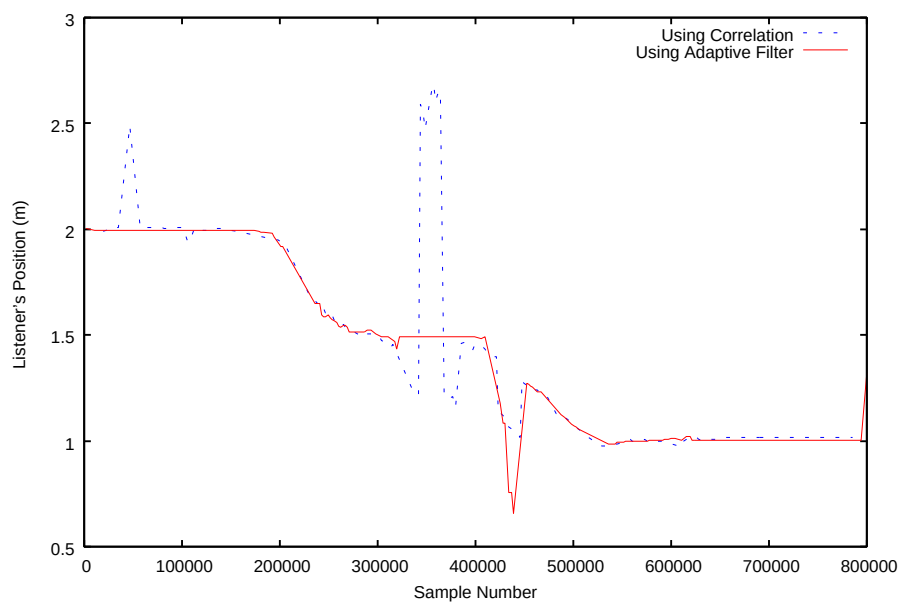


図 3.21 位置情報検出結果 (heb)y 座標

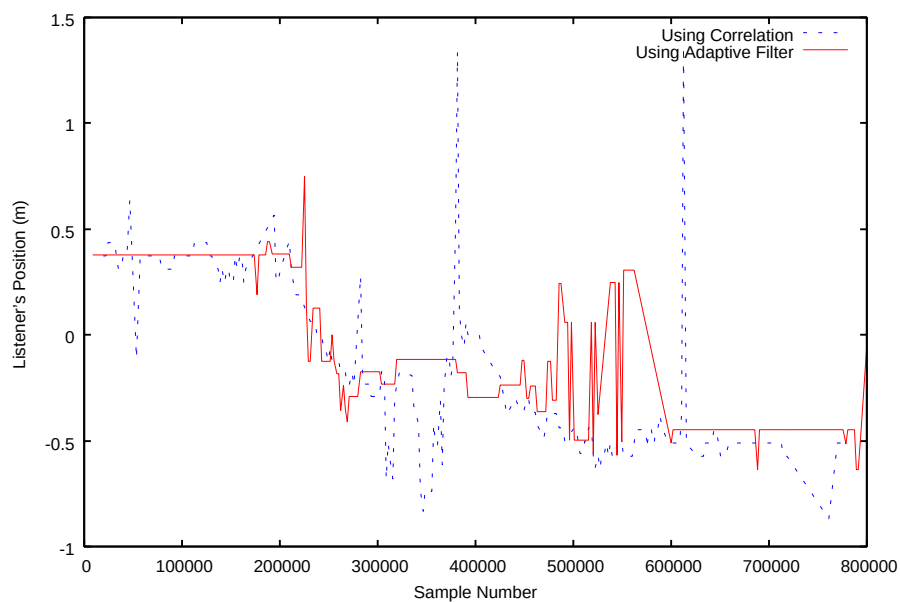


図 3.22 位置情報検出結果 (fed)x 座標

3.9 まとめ

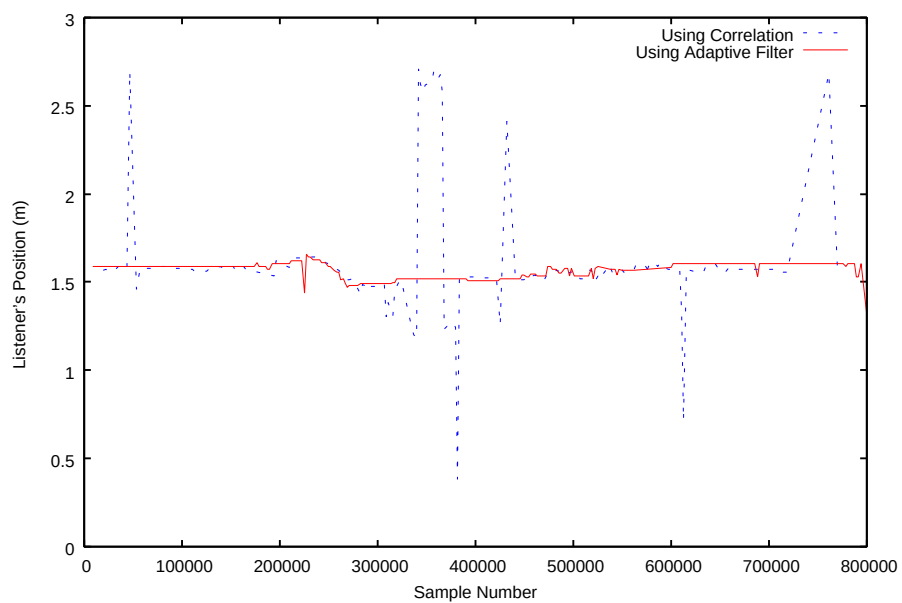


図 3.23 位置情報検出結果 (fed)y 座標

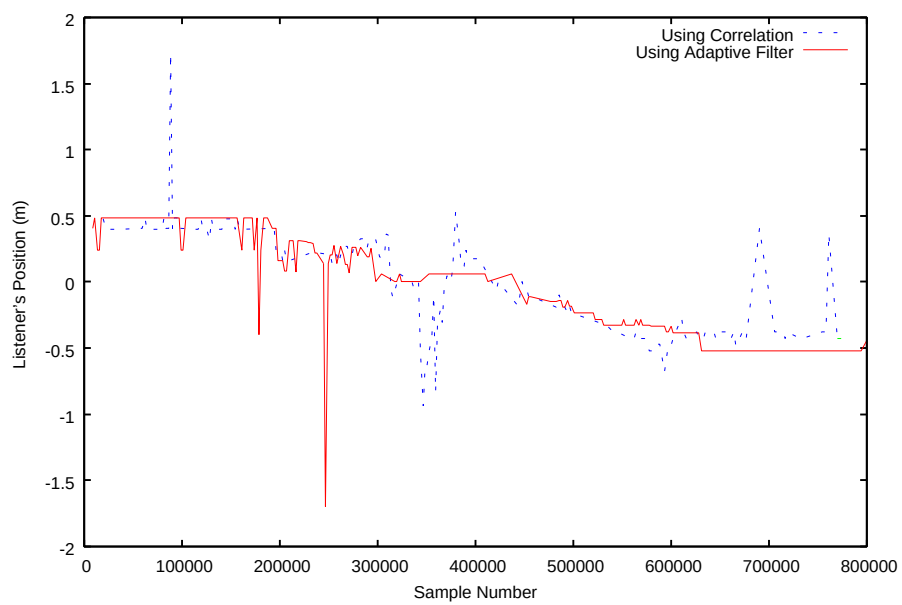


図 3.24 位置情報検出結果 (iea)x 座標

3.9 まとめ

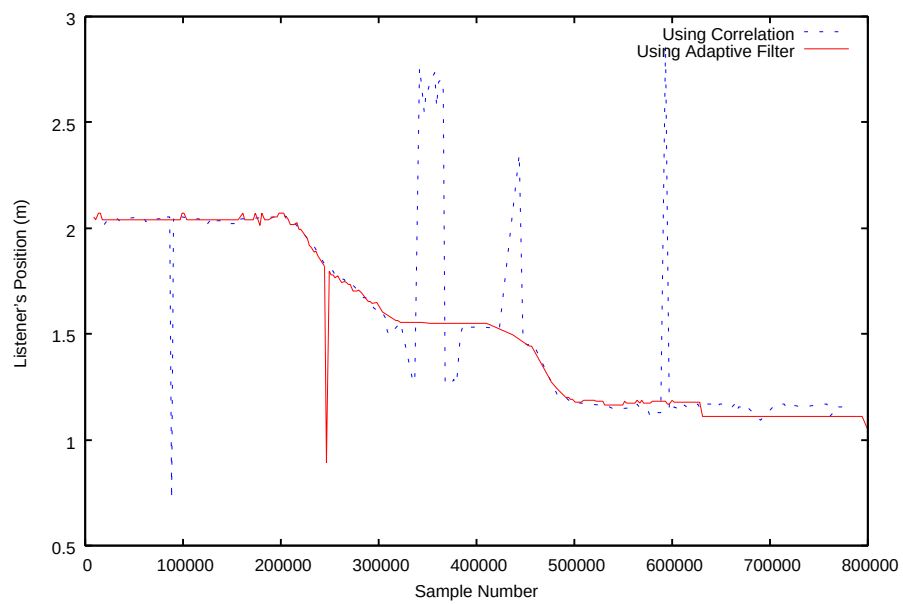


図 3.25 位置情報検出結果 (ica)y 座標

第 4 章

組み合わせた手法

4.1 はじめに

本章では，これまでに提案してきた手法の問題点を提示し，それを解決する手法を新たに提案する．

4.2 これまでの提案手法の問題点

これまでに提案してきた手法での問題点について提示する．

相互相関を用いた場合においては，相関対象サンプル数を小さくすれば，移動検出の遅延を小さくすることができ，相関対象サンプル数を大きくすれば，その遅延は大きくなる．また，音源に用いる信号によって，移動検出結果に違いが現れていることも確認した．これは，白色雑音は定常的な信号であるが，音声信号は定常的な信号ではないため，相互相関による移動検出精度の悪化に繋がっていると考えられる．

適応フィルタを用いた場合においては，受聴者の移動範囲を広くカバーしたい場合，適応フィルタのフィルタ長を長く設定する必要があります．しかしながら，このフィルタ長を長くすれば遅延の発生に繋がります．

4.3 新たな手法の提案

上で述べた問題点を解決するため，相互相関と適応フィルタそれぞれの手法を組み合わせることで受聴者位置検出をする方法を提案する．

4.3 新たな手法の提案

4.3.1 問題点の改善策

相互相関を用いた場合、相関対象サンプルを小さくした場合において素早く受聴者の位置を検出できる特性がある。そこで、相互相関による移動検出結果を用いて適応フィルタのフィルタ初期化タイミングを決定するようにする。これにより、音声信号が音源で適応フィルタを用いた場合による受聴者移動後のフィルタ再学習中の時間を短縮させることが可能であると考えられる。

本手法では、音源から左右それぞれの耳までの伝達時間を計測している。左右それぞれの伝達時間差は、最大でも左右耳間の距離を上回ることはないと考えられる。この伝達時間差が最大になるのは、受聴者の左右耳と音源が一直線上に並んでいる場合である。しかし、本研究では受聴者の首の回転は考えないものとしている。よって、左右の伝達時間差が左右耳間の距離より大きくなった場合においては、正しい伝達時間が測定できていないと判断する必要がある。

また、音声信号音源とした場合の相互相関を用いたシミュレーション結果により、音源信号が小さい場合において位置検出結果に誤りが出やすい傾向があることが確認されている。これは、音源が小さい場合において周りの環境の音がマイクロフォンで主に観測されるためである。この場合は、音源信号と観測信号は異なったものとなるため、おのずと相関値も小さくなると考えられる。この対策として、音源信号が小さい場合においては位置検出処理をさせないようにし、誤った位置検出結果を出力させないようにする方法が考えられる。これにより、明らかに誤っている位置検出結果の出力を防ぐことが可能であると考えられる。

その他、受聴者が移動している最中において観測音に受聴者が発した音が混入する場合は考えられる。この場合も同様に、音源信号が小さい場合において位置検出結果にその影響が顕著に現れると考えられる。よって、音源信号が小さい場合においては位置検出処理をさせないようにし、誤った位置検出結果を出力させないようにする方法が考えられる。これにより、明らかに誤っている位置検出結果の出力を防ぐことが可能であると考えられる。

4.3 新たな手法の提案

4.3.2 新たな手法

上記の改善策を基に新たな受聴者位置情報取得の手法を提案する。

現在、音の到着時間を音源から左右の耳までのそれぞれを計測している。この到着時間の差が大きく出た際に誤った位置が検出されている場合が見受けられる。本来、この到着時間差は左右耳間の長さより大きくなることはないと考えられる。よって、到着時間差が左右のマイクロフォン間より大きくなった場合については、新たに位置情報の更新を行わないようにすることにより、誤った検出を減少させることができると考えられる。

受聴者が移動中において、突然位置検出結果に大きな変化が現れるといった現象が確認されている。この改善策として、受聴者が短時間に大きな移動があったと判断された場合において、その情報を信頼しないようにするという方法が考えられる。この際、誤った変化が現れているのは移動直前と移動後の 8,820 サンプル程度であり、誤った位置検出結果が連続してあらわれているわけではない。よって、受聴者が移動し始める瞬間と移動し終わる瞬間において何らかの処理を行う必要があると考えられる。どの程度の移動検出結果の差が突発的な誤った検出であると判断するのが問題であるが、0.1 秒（4,410 サンプル）の間に 100cm 以上の移動は考えないという前提とする。0.1 秒間に 100cm の移動ということになり、秒速 10m ということになり、一般人においては考えにくい速度で移動していることとなる。また、助走をつけて移動しているわけでもないため、なおさらこの移動速度は考えにくいといえる。この変動しきい値は暫定値とし、適宜変更しながらシミュレーションを行うこととする。

音源信号と観測信号の相関値は、それら 2 つの信号の類似度を示しているといえる。この値が小さくなると、2 つの信号は類似していないといえるため、周りの環境音等を観測用マイクロフォンが受音することによる影響であると仮定することができる。また、音源信号が無音の場合を考えると、観測用マイクロフォンが受音する音は周りの環境音であると考えられ、その際の相関値は小さくなるものと考えられる。これらの結果を考慮し、相関値がある一定の値を下回った場合においては、適応フィルタの更新を止めるようにする。これにより、誤った学習を行う可能性を排除することができると考えられる。図 4.1 は、相関値の変化を

4.3 新たな手法の提案

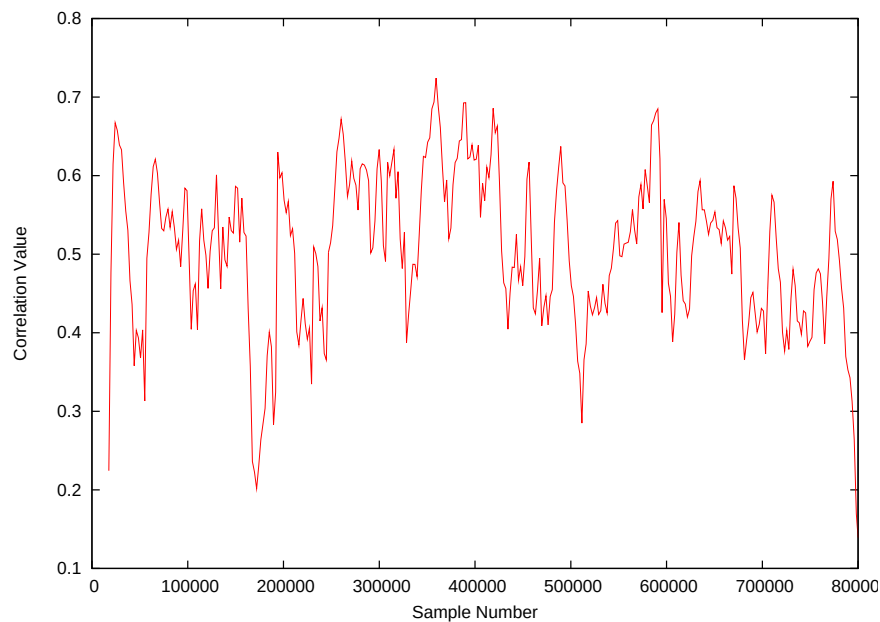


図 4.1 相関値の変化

表したものであるが、音源が小さい場合、また受聴者が移動中において相関値が小さくなっていることが確認できる。

適応フィルタを用いた受聴者位置検出においては、適応フィルタのパラメータを変化させることにより、移動検出の速度や精度に変化が見られる。一般的に音声信号を用いる場合においては、ステップゲインの値を 1.0 に設定した場合誤った推定を行う場合があるため、ステップゲインの調整には注意を要する。

最後の問題として、音源信号が小さい場合における受聴者位置検出結果の誤判定がある。これは、音源信号が大きい場合に比べて周りの環境の音をマイクロフォンが集音しやすくなり、実際の音源位置から出ていない別の音が混入することにより、位置検出が正しく行われなくなるためである。よって、音源信号が小さい場合においては、受聴者位置検出を行わないようにする必要がある。この音源が小ささの基準については、音源信号より周りの環境音の方が大きい場合に問題があるため、音源信号の振幅が極めて 0 に近い場合においては受聴者位置検出を行わない措置をとることとする。この処理は、音源信号が受聴者へ届いていない状態である場合に適用されるものであり、音源以外の信号との相関や適応フィルタの

4.4 実験

誤った学習を防ぐことができるため、問題ないと考えられる．ここでは、音源信号の振幅の絶対値が 250 以下である場合において受聴者位置検出を行わないようにする．これは、絶対値 250 以下の信号を再生した際においては、ラウドスピーカから出力する音源信号以外の周りの環境の音を観測用マイクロフォンが受音する可能性が高いという考えから導き出されたものである．この値は暫定値とし、適宜変更しながらシミュレーションを行うこととする．なお、扱うデータの量子化ビットを 16 ビットとしているため、信号がとりうる値の範囲は-32768 から 32767 となっている．

これらの解決策をすべて組み込み、実験を行うことにより提案手法の有効性を検証した．

4.4 実験

実験により、新たに提案した受聴者移動検出法の評価を行う．

4.4.1 実験条件

音源にラウドスピーカ、受聴者は人間の顔を模したダミーヘッドを用いる．このダミーヘッドには、左右の耳部分にコンデンサマイクが埋め込まれている．音源信号には、図 4.2 に示すサンプリング周波数 44.1kHz の音声信号を用いる．音源と受聴者の配置については図 3.19 に示す．受聴者の移動順序については、表 4.1 に示す．受聴者の移動方法については、人がマイクスタンドに付いたダミーヘッドを手動で移動させるようにする．開始地点から中間地点へゆっくり移動した後、3 秒程度その場を動かずその後に最終地点へとゆっくり移動させるようにする．受聴者の観測信号を図 4.3 に示す．相互相関のパラメータ設定を表 4.2 に、適応フィルタのパラメータ設定を表 4.3 に示す．本シミュレーションでのパラメータ設定においては、シフト幅とフィルタ長を 500 に設定しているため、受聴者の前後方向の移動距離を最大 385cm までと考えていることになる．これ以上の移動距離に対応させるにはシフト幅およびフィルタ長を大きくする必要がある．

また、相互相関の値が 0.45 を下回った際には、フィルタ係数の更新を行わないようにす

4.4 実験

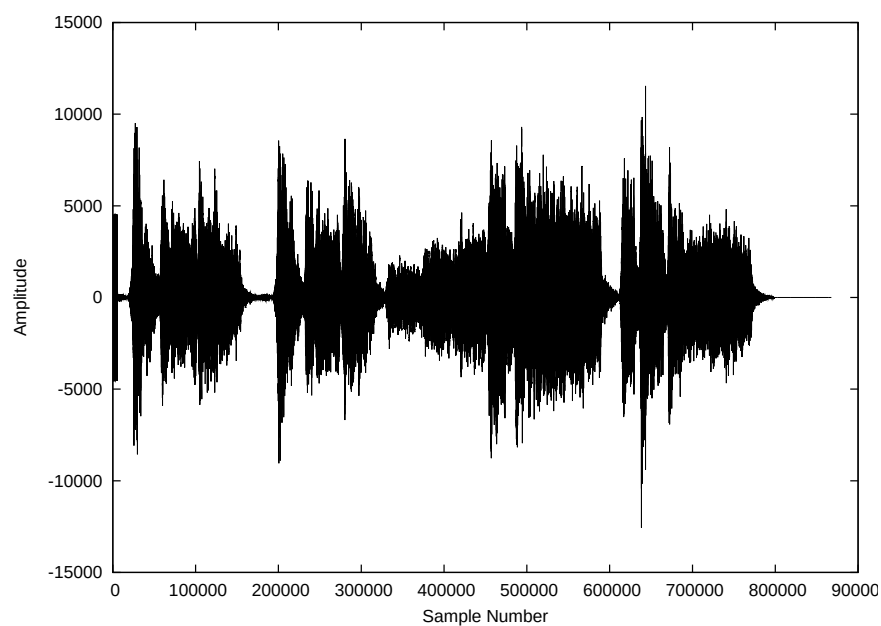


図 4.2 入力信号

る．この条件で，相互相関を用いた手法と適応フィルタを用いた手法それぞれの移動検出性能の評価を行う．

表 4.1 受聴者の移動順序

前後	$a \rightarrow d \rightarrow g$
	$h \rightarrow e \rightarrow b$
	$c \rightarrow f \rightarrow i$
左右	$a \rightarrow b \rightarrow c$
	$f \rightarrow e \rightarrow d$
	$g \rightarrow h \rightarrow i$
斜め	$g \rightarrow e \rightarrow c$
	$i \rightarrow e \rightarrow a$
	$c \rightarrow e \rightarrow g$

4.4 実験

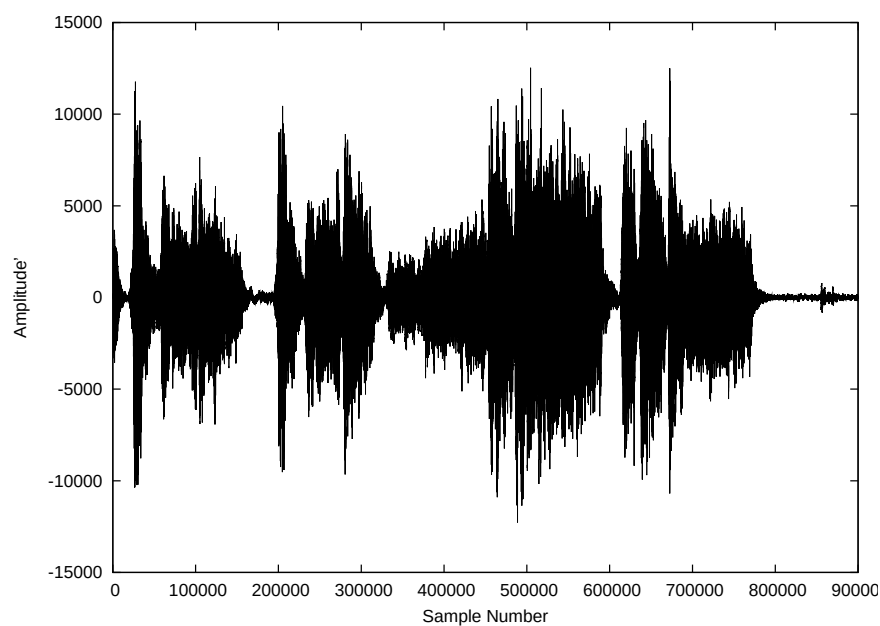


図 4.3 観測信号 (iea)

表 4.2 相互相関のパラメータ

相関対象サンプル数	8,820 サンプル
オーバーラップ	4,410 サンプル
シフト幅	500 サンプル

4.4.2 実験結果

実験結果を図 4.4, 4.5, 4.6, 4.7, 4.8, 4.9 に示す。ここでは、実験結果を前後, 左右, 斜め移動それぞれから 1 つずつ示すこととする。また、位置情報は x 軸と y 軸それぞれ別のグラフで示している。

新たな手法を取り入れる前と比較すると、受聴者の移動直後に見られていた誤った位置検

表 4.3 適応フィルタのパラメータ

フィルタ長	500
ステップゲイン	0.5

4.5 まとめ

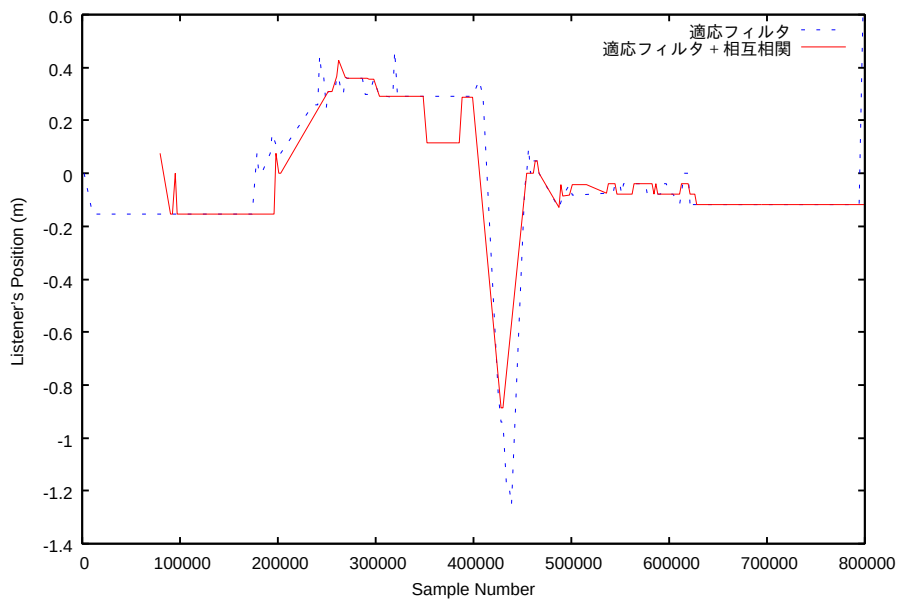


図 4.4 位置情報検出結果 (heb)x 座標

出を減少できていることが確認できる。これは、音源から受聴者の耳元までの伝達時間が受聴者が移動している最中に不安定になりがちであるため、その間の位置検出は信頼できない結果が現れることが想定される。これは、受聴者は移動中に必ずしも真正面を向いているとは限らないとされ、進行方向へ向いて移動することが多いと考えられるためである。その対策として、受聴者の移動中においては、受聴者位置検出は行わないようにしている。その結果、移動中の誤った位置検出結果が少なくなっているといえる。

4.5 まとめ

本章では、これまで提案してきた手法の問題点を解決するための手法を提案し、その有効性を実験を行うことにより検証した。実験結果により、新たな提案手法の方が受聴者の誤った位置検出を防ぐ効果を確認することができた。

4.5 まとめ

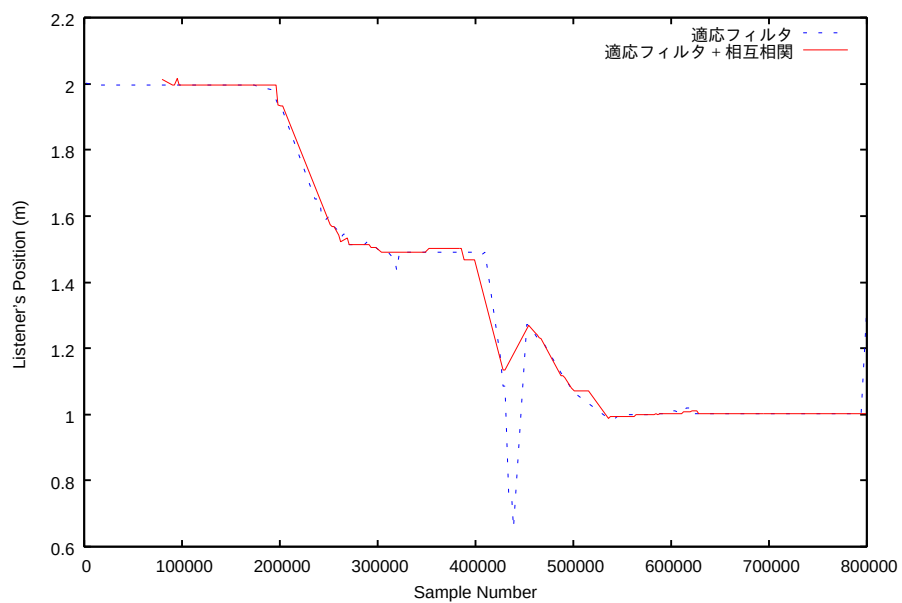


図 4.5 位置情報検出結果 (heb)y 座標

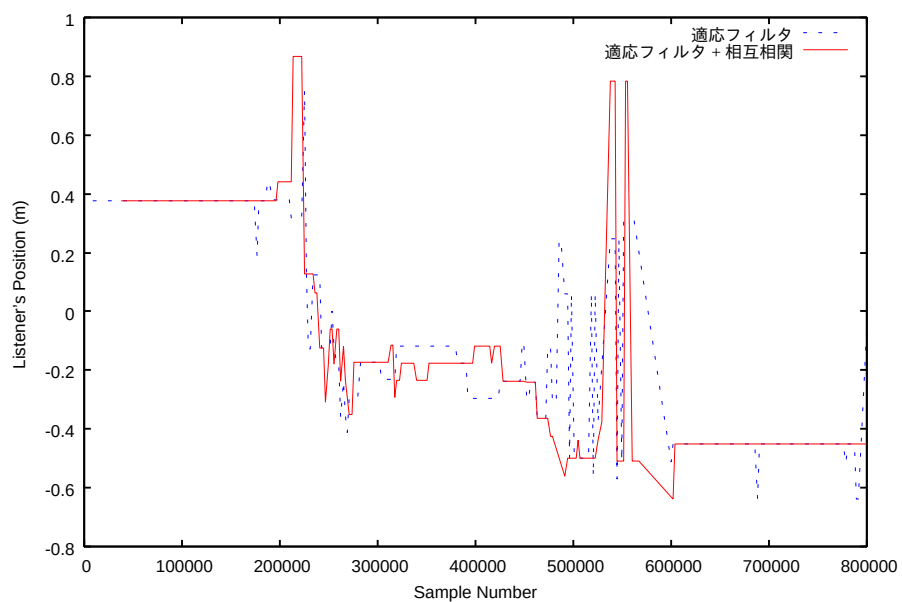


図 4.6 位置情報検出結果 (fed)x 座標

4.5 まとめ

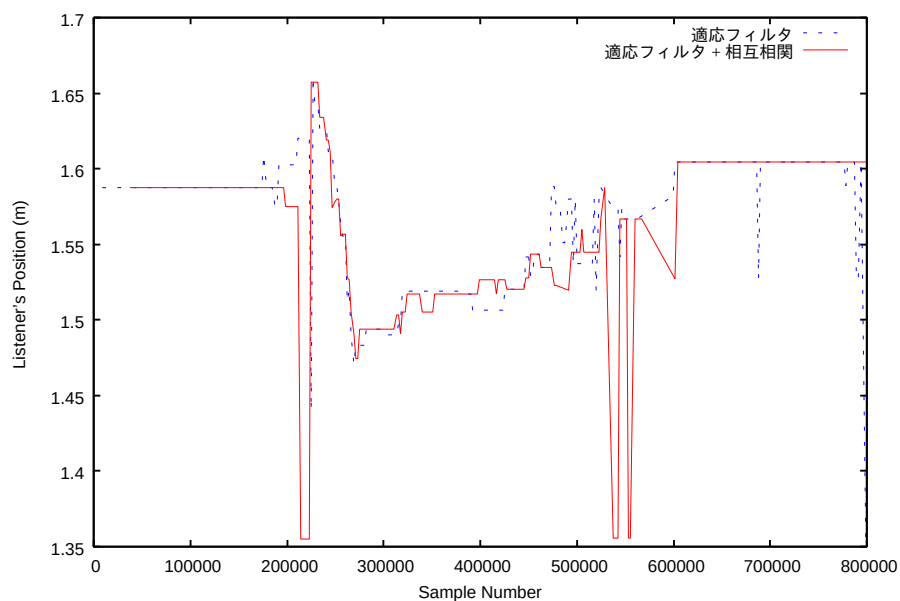


図 4.7 位置情報検出結果 (fed)y 座標

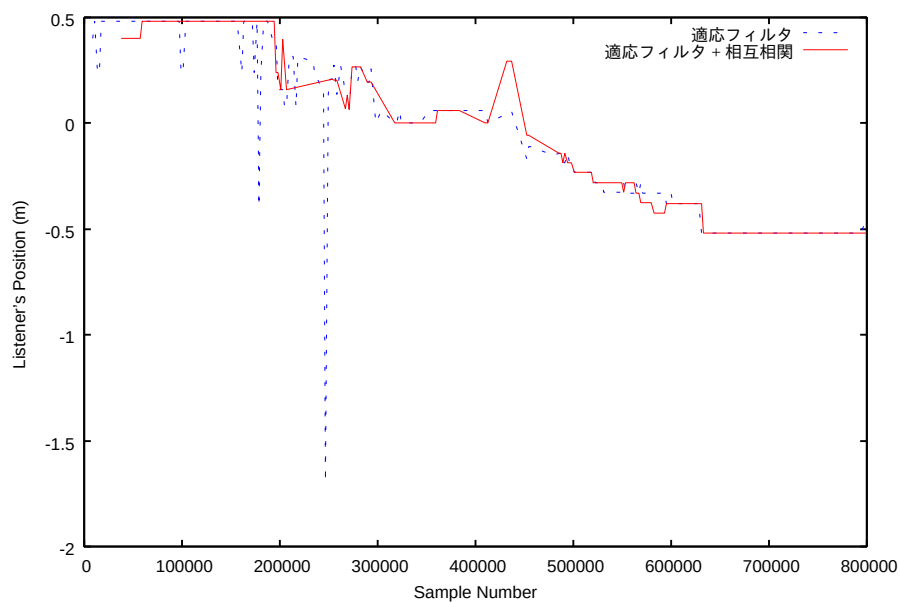


図 4.8 位置情報検出結果 (iea)x 座標

4.5 まとめ

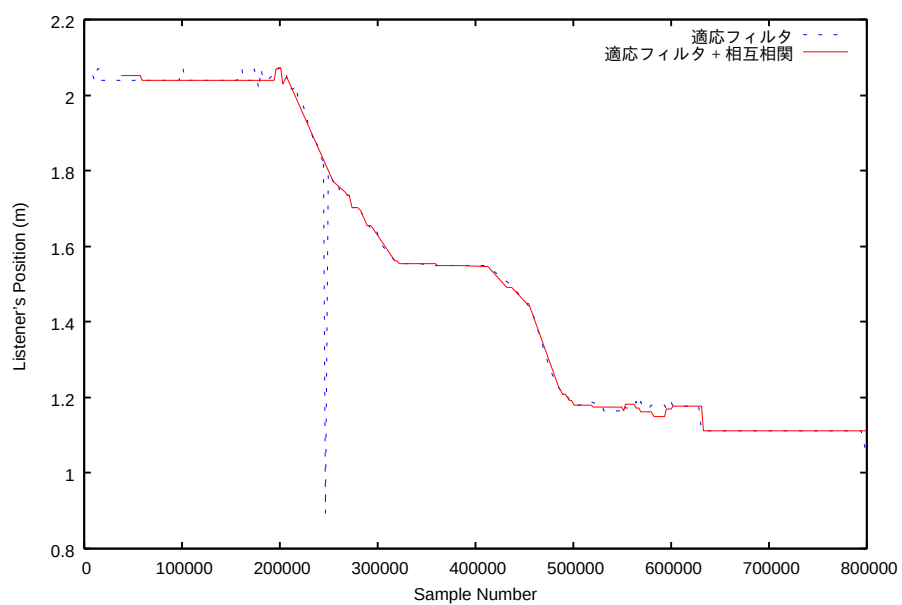


図 4.9 位置情報検出結果 (iea)y 座標

第 5 章

結論

5.1 本研究のまとめ

本論文では，信号補正システムの問題点を提示し，その問題点の解決策として相互相関と適応フィルタそれぞれを用いた受聴者位置情報の検出法について提案した．以前の研究において，計算機シミュレーションにより相互相関と適応フィルタそれぞれを用いて受聴者位置検出がある程度可能であることを確認している，しかしながら，従来手法においては受聴者移動時において誤った位置検出結果を出力することが確認されていた．これは，受聴者が移動する際の足音であったり，音源信号が小さく周りの環境音を受音してしまった場合によるものであると考えられる．

本研究での提案手法においては，受聴者移動時の処理を新たに加えることにより，受聴者移動中における位置検出性能の向上を図った．移動中の処理を加えた手法の有効性を計算機シミュレーションと実験により確認した．

本手法を信号補正システムに組み込むことにより，受聴者が移動した際にも短時間で正しい音場を再現することが容易に可能になると考えられる．

5.2 今後の展開

提案した位置検出の手法は，受聴者の頭部の回転を考慮していないため，そのような動作があった場合には誤った位置検出が行われる．本研究では，単一音源での受聴者位置検出を行ったが，その場合における受聴者の頭部回転については検出することが不可能である．

5.2 今後の展開

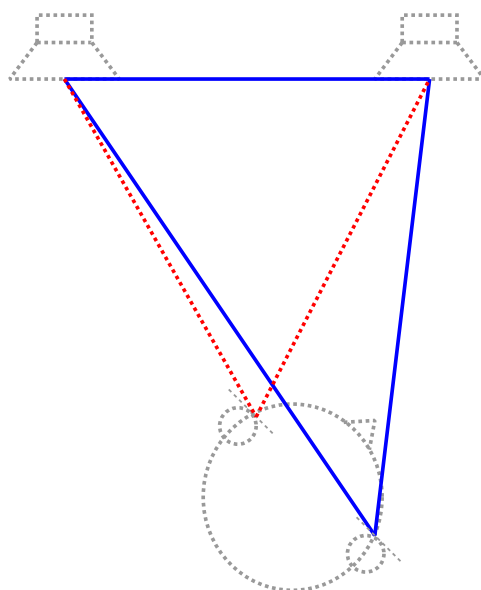


図 5.1 音源が複数ある場合の受聴者位置検出

しかしながら，音源が複数である場合については，条件が限定されるが頭部の回転を検出可能であると考えられる．よって，今後の展開として音源が複数の音場再生における受聴者位置検出法の検討を行っておく．

図 5.1 は，ステレオ再生における受聴者の左右耳それぞれの座標を得る際に必要な三角形の 3 辺を示している．この手法では本研究での提案手法を応用し，スピーカ間の距離と受聴者のそれぞれの音源から片耳に届くまでの時間を用いることで，左右耳の座標を得る．ただし，音源を複数とした場合，受聴者側のマイクロフォンでは複数の音源信号が合わさって観測されることとなる．よって，この手法を実現させるためには，左右それぞれのスピーカから出る音源信号を受聴者側のマイクロフォンで分離可能でなければならない．音源を分離することが可能であれば，受聴者の左右耳それぞれの座標を得ることができると考えられる．また，推定した頭部の位置と実際の位置にずれがある場合を考慮した音源配置に関する研究 [10] が行われているため，音源の配置方法も考慮する必要があると考えられる．

謝辞

本研究を行うにあたって、御指導して頂いた福本昌弘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坂本明雄教授、吉田真一講師にも感謝致します。佐伯幸郎先生、福富英次先生には、学部3年時から研究室での活動において様々な面で御世話になり、とても感謝しております。

研究室のメンバーには個性的な人が多く、とても楽しませてもらいました。修士1年の徳久君には、隣の席の方があまり出現しなかったため、よくちょっかいを出させてもらいましたが、おもしろいリアクションを返してくれるのでとても楽しかったです。彼がいなければ、一生ポン菓子をお口にすることが無かったといっても過言ではありません。学部4年のみなさんには、日頃からおもしろい会話が聞こえてきて、たくさん笑わせてもらいました。とくに森田君の言動にはとても感銘を受けました。

最後に、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] 浜崎真二，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.
- [2] 浜崎真二，“クロストーク成分における相互相関に着目した音場再生システム，” 平成 16 年度 修士学位論文，2005.
- [3] 一色雄太，“受聴者の移動に対応した音場再生システム，” 平成 18 年度 修士学位論文，2007.
- [4] 金井宏一郎，福本昌弘，佐伯幸郎，“観測音間の相互相関を用いた受聴者移動の検出，” IEICE SIP Symposium 2008，B6-5，Nov 2008.
- [5] 金井宏一郎，佐伯幸郎，福本昌弘，“観測音を用いた受聴者移動の検出，” IEICE SIP Symposium 2009，A4-1，Nov 2009.
- [6] 渡部英二，デジタル信号処理システムの基礎，森北出版，2008.
- [7] イブ・トーマス，中村尚五，プラクティスデジタル信号処理，東京電機大学出版局，1995.
- [8] 三谷政昭，やり直しのための信号数学，CQ 出版社，2005.
- [9] 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.
- [10] 阿部一任，浅野太，鈴木陽一，“頭部の位置ずれを考慮した頭部伝達関数模擬手法における音源配置の影響について，” IEICE EA，応用音響 93(9)，pp.21-28，Apr 1993.

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

LMS アルゴリズムは、2 乗平均誤差を最急降下に基づいて最小にする方式で、安定感があり、演算量が少ないという特徴から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、学習同定法を開発した。これは、先に述べた LMS アルゴリズムに比べると複雑ではあるが、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、収束速度が著しく劣化するといった欠点もある。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 (RLS) アルゴリズムと一致する。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

A.3 学習同定法

すれば、RLS アルゴリズムは演算量からリアルタイム処理は困難といえる。

A.3 学習同定法

学習同定法は、別名 NLMS 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。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、

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

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。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、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、

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

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、

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

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

A.3 学習同定法

が成立するので，式 A.2 は，

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

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

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

で与えられる．