

平成 22 年度
修士学位論文

ネットワーク上のリソースによる分散音場 再生処理

**Distributed Processing for Sound Field Reproduction
Using Network**

1135072 徳久 翔太

指導教員 福本 昌弘

2011 年 2 月 27 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

ネットワーク上のリソースによる分散音場再生処理

徳久 翔太

近年，音声に臨場感を与える技術として音を録音した環境の特性を再現する音場再生技術が注目されている．しかし，音場再生処理には高性能な処理装置が要求される．そのため，音場再生を容易に利用することができない．そこで，この音場再生技術をネットワーク分散処理で行う手法が提案されている．ネットワーク上のサーバで音場再生処理を行うことで，リスナーは最低限の処理で音場再生処理を利用することができる．しかし，従来の手法はサウンドデバイスや TCP/IP ネットワーク通信などで発生する可能性のある遅延による影響を考慮しておらず，遅延の影響を大きく受けてしまう．

本研究では，安定した音場再生を提供するための新たな分散処理手法を提案している．提案手法では，新たに遅延対策としてネットワーク通信による遅延の感知とサウンドデバイスによる遅延の感知，また，システムが継続してより安定したフィルタ推定を行うための対策を講じている．また，計算機シミュレーションを行い，誤差の平均と分散を示すことで，従来手法より安定した精度の音場再生処理であることを示している．

加えて，より高速なネットワークにおいて効果的であると考えられる分散音場再生処理を提案している．

キーワード 音場再生，適応信号処理，ネットワーク分散

Abstract

Distributed Processing for Sound Field Reproduction Using Network

Shota Tokuhisa

In recently years, the sound field reproduction system draws attention as a technique. that reproduct a frequency character of recording environment. A listener can get high realistic sensation using this technique.

However it is requires a high performance processor for using the sound field reproduction system. As a result, a listener can not use the sound field reproduction lightheartedly. Then, dispersion processing method on TCP/IP network for the sound field reproduction system is proposed. a listener can use the sound field reproduction on minimal processing by the server's processing. However, existing processing methods are affected by a delay. Because it has not a provision for a delay.

In this research, I have proposed a new dispersion processing method for providing the sound field reproduction with accurate system estimate. The proposed methods have measures to ensure poise operation by some provision that detect a delay. In addition, I have shown the proposed method is firmer than traditional method by simulating by some computers and I have shown an error average and an error dispersal.

key words sound field reproduction, adaptive signal processing, despersion processing

目次

第 1 章	序論	1
1.1	研究の目的とその背景	1
1.2	本論文の構成	2
第 2 章	音場再生に用いられる技術	3
2.1	はじめに	3
2.2	バイノーラル録音	3
2.3	音響システムと線形モデル	4
2.4	適応フィルタを用いた逆特性の近似	6
2.5	多チャンネル音場再生システムにおける逆特性近似	8
2.6	2 チャンネル-2 点制御	9
2.7	多入力信号補正法	10
2.7.1	逆特性の近似的推定法	10
2.8	適応フィルタの更新	13
2.9	まとめ	13
第 3 章	ネットワーク上のリソースによる音場再生システムと問題点	15
3.1	はじめに	15
3.2	システムの構成	15
3.3	システムにおける処理の流れ	17
3.4	遅延による問題	18
3.5	まとめ	18
第 4 章	遅延の影響を軽減するための手法提案と評価	20
4.1	はじめに	20

目次

4.2	遅延対策を行う新たな手法の提案	20
4.2.1	ネットワーク通信による遅延に対する対策	20
4.2.2	サウンドデバイスによる遅延に対する対策	21
4.2.3	安定性向上のための事前対策	23
	事前受信による信号数の確保	23
	事前フィルタ推定	24
	フィルタ係数の再設定	24
4.3	ネットワーク通信における遅延対策のシミュレーションによる評価	24
4.3.1	シミュレーション環境	25
4.3.2	シミュレーション条件 1	25
4.3.3	シミュレーション条件 2	25
4.3.4	シミュレーション結果	27
4.4	まとめ	28
第 5 章	複数の適応フィルタを用いた分散音場再生処理システム	29
5.1	はじめに	29
5.2	複数の適応フィルタを用いた逆特性の推定	29
5.3	複数の適応フィルタを用いた場合の計算機シミュレーション	30
5.4	まとめ	33
第 6 章	結論	34
6.1	まとめと今後の課題	34
謝辞		36
6.2	謝辞	36
参考文献		37

目次

2.1	バイノーラルシステムの例	4
2.2	閉空間における信号伝搬の様子	5
2.3	図 2.2 の等価回路	6
2.4	室内伝達特性の補正	6
2.5	MINT 理論に基づく音場制御系	7
2.6	MINT 理論に基づく音場制御系	8
2.7	2 チャネル-2 点制御系モデル	10
2.8	2 チャネル-2 点制御系モデル (クロストーク無し)	11
2.9	逆近似フィルタと構成図	12
3.1	音場再生システムの構成	16
3.2	音場再生システムにおける処理の流れ	17
4.1	ネットワーク通信による遅延の検知処理	21
4.2	サウンドデバイスによる遅延の検知処理	22
4.3	事前受信による信号数の確保のための処理	23
4.4	シミュレーション条件 1 時の所望信号と観測信号の誤差	26
4.5	シミュレーション条件 2 時の所望信号と観測信号の誤差	27
5.1	複数の適応フィルタを用いた逆特性の推定	30
5.2	複数の適応フィルタを用いたシミュレーション結果	32

表目次

4.1	使用した音源	25
4.2	シミュレーション結果 (条件 2)	25
4.3	使用した音源	26
4.4	シミュレーション結果 (条件 2)	27
5.1	使用した音源	31
5.2	シミュレーション結果	32

第 1 章

序論

1.1 研究の目的とその背景

近年，デジタル信号処理技術の向上にともない，高サンプリングレートやマルチチャネルを用いて高品質の音源を扱うことが可能になった．しかしスピーカを用いてその音源を再生するとスピーカを通して耳に聞こえる音は，再生環境における反響や減衰などの環境特性による影響を受けてしまうため，元々の音源とは異なってしまう．そこで，音場再生技術が注目を受けている．

音場再生とは，リスナーの環境の反響や減衰などの影響を取り除いて，リスナーに原音を提供する技術である．その際，リスナーの環境特性は温度や湿度，リスナーの位置などの要因で常に変化しているため，音場再生における補正フィルタのパラメータはリアルタイムで調整されていることが望ましい．しかし，通常の音場再生システムでは，実時間による適応信号処理に高性能な処理装置が必要とされるため，リスナーは容易に音場再生を利用することができない．また，リスナーの端末が複数台ある場合は各端末に高性能な処理装置が必要とされる．そこで，リスナーの端末の性能に関係なく音場再生を提供するシステムが提案されている [1]．

このシステムを実現することで，リスナーであるクライアント側はネットワークを介して音場再生処理を利用することが可能となった．しかし，この従来システムの処理においてはサウンドデバイスやネットワーク通信などで発生する可能性のある遅延に関する対策が施されていない．そのため，遅延による影響を大きく受けてしまい，遅延が発生する状況では安定した音場再生処理を提供できない．

1.2 本論文の構成

そこで，本研究では，ネットワーク分散音場再生システムにおいて，新たな処理手法を提案し安定した特性推定による音場再生処理をリスナーに提供することを目的としている．

1.2 本論文の構成

論文の構成を以下に述べる．2章では，音場再生処理に用いられる録音方法や音場再生を実現するための適応信号処理について説明する．また，2チャンネル2点制御による音場再生について述べ，適応フィルタの更新について説明している．第3章では，ネットワーク上のリソースを用いた分散音場再生処理システムの構成及び処理の流れを説明し，従来の手法の問題点について述べる．そして，第4章では，サウンドデバイスやネットワーク通信で遅延が発生した際の対策及びその他のシステム推定の安定性向上のための対策を行う新たな処理手法を提案する．また，従来手法と提案手法を用いて計算機シミュレーションによる比較を行う．さらに5章では，複数の適応フィルタを用いることにより，より性能の良い分散音場再生処理を行う手法の提案と計算機シミュレーションによる評価を行う．そして最後に，第6章で本研究のまとめとこれからの課題について述べている．

第 2 章

音場再生に用いられる技術

2.1 はじめに

音場再生処理技術は様々な技術から成り立っており、実際に音場再生処理を行う音場再生システムは、目的の違いから、システムを構成するハードウェアや再現手法が異なり、様々なシステムが考案されている。本章では、本研究で使用した音場再生システムにおいて基礎的な部分となる録音方法や適応信号処理について説明し、そして、多入力多出力の入出力系における逆フィルタの設計について説明している。

2.2 バイノーラル録音

録音環境を特性の異なる環境で忠実に再現するためには、まず、原音場に忠実な音源が必要となる。原音場に忠実な音源とは、原音場の反射や残響といった影響を受けた音声である。しかし、原音場でただステレオ録音するだけでは、そのような音源にはならない。なぜなら、実際に聞こえた音というのは耳に入って来た音であるため、耳の形状による影響も受けることになる。そのため、通常のマイクロフォンで録音するだけでは十分とはいえない。そこで、原音場で聞こえる音を録音する方法としてバイノーラル録音がある。ダミーヘッドと呼ばれる人の頭部を模したマイクで録音することで、頭部や耳の形状による影響を受けた音声データを得ることができる。また、この録音方法を用いて原音場を再現するシステムにバイノーラルシステム 2.1 などがある。バイノーラルシステムであれば簡単な構成で原音場を再現することができるが、ヘッドフォンによる影響特性を受けてしまうという問題点がある。本研

2.3 音響システムと線形モデル

究で用いる音場再生システムはバイノーラル録音を用いるが、バイノーラルシステムとは異なり、ヘッドフォンではなくラウドスピーカを用いた原音場の再現を目指している。次に、

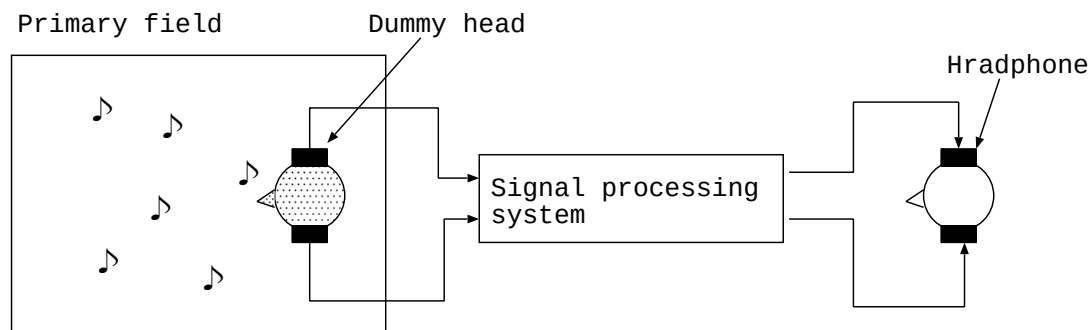


図 2.1 バイノーラルシステムの例

音場再生においてもっとも重要な技術の 1 つである適応信号処理技術について説明する。

2.3 音響システムと線形モデル

音源と受聴点など空間中の 2 点間の音の伝わり方を示す関数を空間伝達関数 $G(z)$ といい、伝達関数 $G(z)$ は空間が屋外などの自由空間の場合、2 点間の距離のみに依存する。これは音圧が音源までの距離に反比例して減衰する特性と、その距離を音が伝搬するのに要する伝搬遅延時間によるものである。一方、原音場が図 2.2 に表すような反射性を持つ閉空間において、音源であるラウドスピーカと受音点であるマイクロフォンを、2 点間での音の伝搬について考える。ここでラウドスピーカに入力した音を $x(t)$ 、マイクロフォンで受信した信号を $y(t)$ とする。このときマイクロフォンで観測される信号 $y(t)$ には、音源から受音点に直接到達する直接音と、壁面で反射された多数の反射音が含まれる。反射音はマイクロフォンで受信されるまでに壁面で反射された回数によって 1 次反射、2 次反射などに分類される。また、音の反射は空間による減衰と壁面による吸音などによって音のエネルギーが消滅してしまうまで繰り返される。音源からパルス波が出力されたとき、マイクロフォンで観測された信号はインパルス応答 と呼ばれる。この観測信号は時間の経過と共に直接音が観測される次に一次反射音、二次反射音などの低次反射音が散発的に観測される。その後、続けて高次

2.4 適応フィルタを用いた逆特性の近似

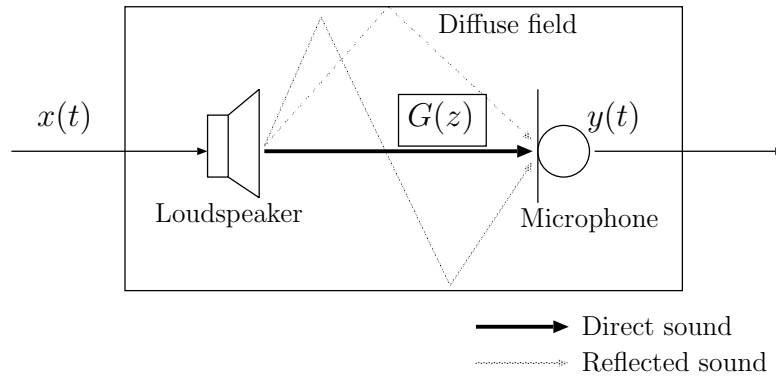


図 2.2 閉空間における信号伝搬の様子

反射音が観測される．ここで，低次の反射音は単に初期反射音と呼ばれ，高次の反射音はインパルス応答長が時間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，マイクロフォン，空間音響伝達系による影響が全て線形であると仮定すると．入力信号 $x(t)$ と出力信号 $y(t)$ の関係はインパルス応答 $g(k)$ と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 $y(n)$ が求められることを意味している．両辺を z 変換することで次式を得ることができる．

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

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 の関係から，図 2.2 伝達系は図 2.3 のような等価回路として表すことができる．このように室内音場における音響システムは線形モデル化することができる．

2.4 適応フィルタを用いた逆特性の近似

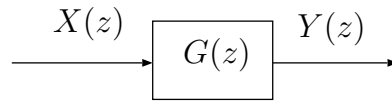


図 2.3 図 2.2 の等価回路

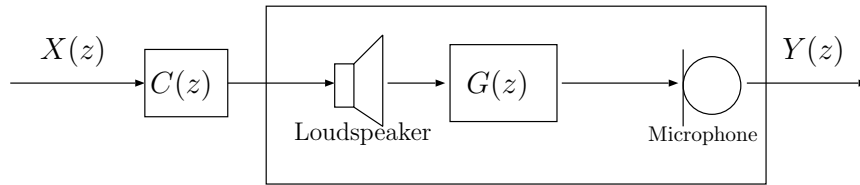


図 2.4 室内伝達特性の補正

2.4 適応フィルタを用いた逆特性の近似

本章の冒頭で説明したバイノーラルシステムと異なり，ラウドスピーカによる原音場の再現を行うシステムのひとつにトランスオーラルシステムがある．トランスオーラルシステムを用いた音場再生では，ラウドスピーカに入力される所望信号が受聴点での観測信号と等しくなるように制御することを目的としている．トランスオーラルシステムにおいては，付録にて説明を行っているので必要であれば参照していただきたい．つまり図 2.3 に示す線形モデルにおいて， $X(z) = Y(z)$ となるように制御する必要がある．しかし実空間上の音場では 2.3 で示したとおり，受聴点における観測信号は伝達特性 $G(z)$ の影響を受けるため，この影響を補正する必要がある．そこで，2.4 に示すように所望信号に対して補正フィルタ $C(z)$ を用いて制御を行う．この補正フィルタは空間伝達特性の逆特性を近似したフィルタである．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，

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

という関係が成り立つ．図 2.4 の関係から補正フィルタと伝達特性を畳み込むことで

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

2.4 適応フィルタを用いた逆特性の近似

となる．したがって伝達特性が 1 を示すとき，受聴点では所望信号 $x(t)$ がそのまま観測されることになる．ただしこのような関係が成り立つためには伝達関数 $G(s)$ の零点が単位円上に存在する最小位相系でなければならない．しかし一般的に室内伝達特性は非最小位相系であり，正確な逆特性を推定する事は困難であることから，式 2.5 のような関係は実現できない．

非最小位相系で逆近似を実現するための方法として，逆特性の誤差エネルギーを最小にすることで伝達特性の近似的に求める手法が提案されている．代表的な手法として FIR フィルタを用いて近似する手法が挙げられる．これは

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

で与えられる誤差 $E(z)$ のエネルギー ($E(z)$ の 2 乗) を最小にする $C(z)$ の探索問題に帰着する．ここで $G(z)$ が最小位相系となる場合，逆特性 $1/G(z)$ の近似は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ことから，安定化させるような様々な工夫がなされている．具体的には不要となる零点の除去や，遅延や雑音を付加による方法が提案されている．

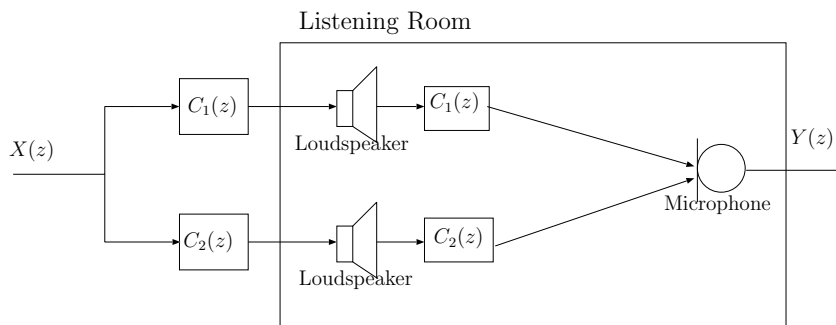


図 2.5 MINT 理論に基づく音場制御系

一方，MINT の理論によると，複数の空間伝達経路を設けることにより，特性が最小位相を示さない場合でも正確な逆特性を実現できることが示されている．図 2.5 に MINT 理論に基づく音場制御系について示す．受音点において観測信号 $Y(z)$ は

$$\begin{aligned} Y(z) &= G_1(z)C_1(z)X(z) + G_2(z)C_2(z)X(z) \\ &= (G_1(z)C_1(z) + G_2(z)C_2(z))X(z) \end{aligned} \quad (2.7)$$

2.5 多チャンネル音場再生システムにおける逆特性近似

と表される．この系において逆フィルタ処理を行うには，次の関係を満たす FIR フィルタ $C_1(z)$, $C_2(z)$ を求める必要がある．

$$G_1(z)C_1(z) + G_2(z)C_2(z) = 1 \quad (2.8)$$

この解の存在条件として， $G_1(z)$, $G_2(z)$ が有限であり，かつ共通の零点を持たないという条件がある．この条件を満たすとき，式 2.8 を満たす $C_1(z)$, $C_2(z)$ が存在することを数学的に証明されている．

2.5 多チャンネル音場再生システムにおける逆特性近似

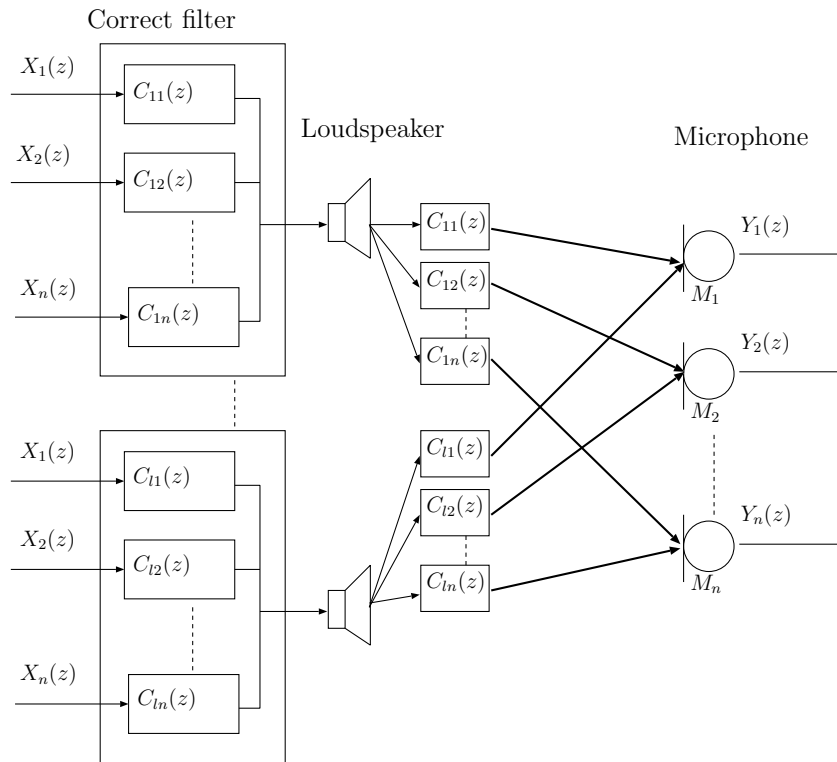


図 2.6 MINT 理論に基づく音場制御系

図 2.6 に音減数 l ，制御点数 n の多チャンネル音場再生系において逆特性を近似するための近似逆フィルタの構成を示す．室内伝達関数のインパルス応答を $G_{jk}(z)$ ，補正フィルタを $C_{jk}(z)$ ，所望信号を $X_l(j)$ ，観測信号を $Y_l(z)$ とする．また $j(= 1, 2, \dots, l)$ および $k(= 1, 2, \dots, n)$ はそれぞれ音源及び制御点の番号である．多チャンネル音場再生システムで

2.6 2 チャネル-2 点制御

は、各制御点に対する制御を他の点とは独立に行うことが望ましい．そこで補正フィルタ群においては入力信号 $X_j(z)$ をパルスとしたときに、制御点 M_j にのみパルスが観測されるような補正フィルタ群を基本単位とする．すなわち

$$G(z)C(z) = I_l \quad (2.9)$$

を満たす $C(z)$ を求めればよい．ただし

$$G(z) = \begin{bmatrix} G_{11}(z) & G_{12}(z) & \cdots & G_{1l}(z) \\ G_{21}(z) & G_{22}(z) & \cdots & G_{2l}(z) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ G_{n1}(z) & G_{n2}(z) & \cdots & G_{nl}(z) \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

$$C(z) = \begin{bmatrix} C_{11}(z) & C_{12}(z) & \cdots & C_{1l}(z) \\ C_{21}(z) & C_{22}(z) & \cdots & C_{2l}(z) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ C_{n1}(z) & C_{n2}(z) & \cdots & C_{nl}(z) \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

とし、 I_l は $l \times l$ の大きさの単位行列とする．各制御点に対して、上記の補正フィルタ係数を求め、それらの 2 次音源毎に畳み込むことで逆特性を近似する制御系が構築される．

2.6 2 チャネル-2 点制御

ここでは 2 つの音源を用いて 2 つの制御点に対して制御を行う音響系について線形モデル化を行う．このモデル化の結果から 2 つのスピーカから出力される原音と制御点での観測信号が一樣に等価できないことを示す．図 2.7 に 2 チャネル-2 点制御系モデルを示す．観測点における観測信号 y_i は入力信号 x_i および室内伝達特性 $g_{ij}(k)$ を用いて以下の式で与えられる．

$$y_1(t) = x_1(t)g_{11} + x_2(t)g_{21} \quad (2.12)$$

$$y_2(t) = x_2(t)g_{22} + x_1(t)g_{12} \quad (2.13)$$

ここで式 2.13 における観測信号は、入力信号 x_1 が伝達特性 g_{11} の影響を受けて届く直接信号と、入力信号 x_2 が伝達特性 g_{21} の影響を受けて届くクロストーク信号の総和となる．ま

2.7 多入力信号補正法

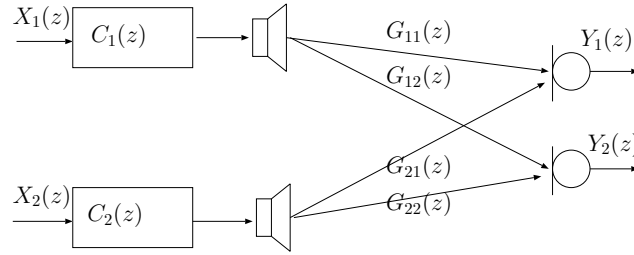


図 2.7 2 チャネル-2 点制御系モデル

た，式 2.13 においても同様に直接信号にクロストーク信号の総和となる．クロストーク信号とは，ある受聴点に伝わるはずの信号が別の受聴点に直接伝わってしまう信号のことである．以上のことから補正フィルタ $C_i(z)$ は直接信号の伝達特性の影響とクロストークの影響を除去あるいは軽減できることが望まれる．

2.7 多入力信号補正法

本節ではまず，再生空間においての伝達特性の影響を軽減させるために，適応フィルタを用いて近似的に再生空間における逆特性を推定する手法について説明をする．

2.7.1 逆特性の近似的推定法

本節では，伝達特性の影響を軽減させる方法として適応フィルタを用いて，逆特性を近似的に導出する手法について述べていく．説明を簡略化するために，ここでは図 2.8 クロストークの影響がない線形モデルについて考える．原音である所望信号 $x_i(t)$ が補正フィルタ $C_i(t)$ 通過後の信号 $d_i(t)$ は次のように表される．

$$d_i(t) = c_{i,L} x_{i,L}^T(t) \quad (2.14)$$

ここで

$$c_{i,L} = [c_{i,0}, c_{i,1}, \dots, c_{i,L}] \quad (2.15)$$

$$x_{i,L} = [x_i(t), x_i(t-1), \dots, x_i(t-L)] \quad (2.16)$$

2.7 多入力信号補正法

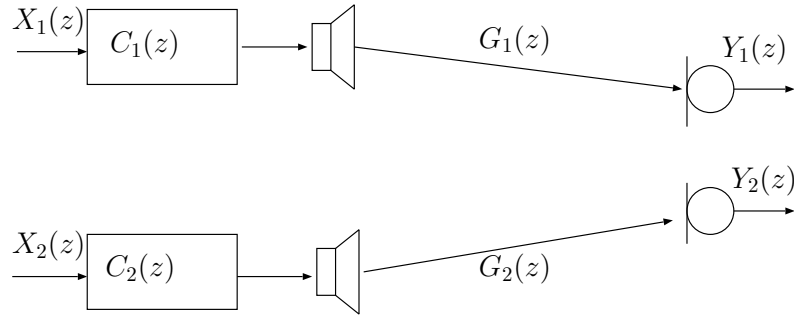


図 2.8 2 チャンネル-2 点制御系モデル (クロストーク無し)

となる．また， L は補正フィルタのインパルス応答長である．このとき観測信号 $y_j(t)$ は

$$y_j(t) = d_{i,L_g}(t) g_{ij,L_g}^T \quad (2.17)$$

となる．ただし

$$d_{i,L_g}(t) = [d_i(t), d_i(t-1), \dots, d_i(t-L_g)] \quad (2.18)$$

$$g_{ij,L_g} = [g_{ij}(0), g_{ij}(1), \dots, g_{ij}(L_g)] \quad (2.19)$$

である．この際に補正フィルタ $C(z)$ が伝達関数 $G(z)$ に対する近似逆フィルタと同様の性質を持っていると仮定したならば， z 変換による表現により以下に示される近似式が成り立つ．

$$\begin{aligned} Y_j(z) &= G_{ij}(z) D_i(z) \\ &= G_{ij}(z) C_i(z) X_i(z) \\ &\approx G_{ij}(z) g_{ij}^{-1}(z) x_i(z) \\ &= x_i(z) \end{aligned} \quad (2.20)$$

これは，伝達関数に対する近似逆フィルタを用いることで原音である所望信号と制御点での観測信号が等しくなる可能性があることを示している．図 2.9 に近似逆フィルタ係数を推定するための構成図を示す．伝達特性 g_{ij,L_g} の逆特性を推定するための適応フィルタ係数を $h_{ij,L}(t)$ ，適応フィルタの入力状態ベクトルを $y_{ij,L}(t)$ とすると，入出力関係は

$$s_{ij,L}(t) = h_{ij,L}^T(t) y_{ij,L}(t) \quad (2.21)$$

2.7 多入力信号補正法

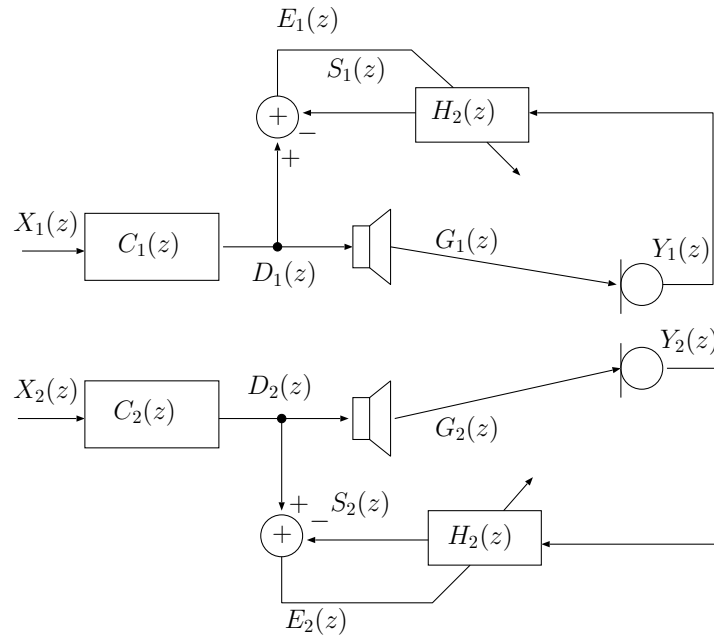


図 2.9 逆近似フィルタと構成図

で与えられる。ただし

$$h_{ij,L}(t) = [h_{ij,0}(t), h_{ij,1}(t), \dots, h_{ij,L}(t)] \quad (2.22)$$

$$y_{j,L}(t) = [y_j(t), y_{t-1}(t-1), \dots, y_j(t-L)] \quad (2.23)$$

である。一方、系への入力信号を式 2.14 で与えられるものとする、出力誤差 $e_{ij}(t)$ は

$$e_{ij}(t) = d_i(t) - s_{ij}(t) \quad (2.24)$$

となる。ここで、出力誤差が $e(t) = 0$ の場合を考えると

$$y_{j,L}(t) h_{ij,L}^T(t) = x_{i,L}(t) c_{j,L}^T(t) \quad (2.25)$$

となる。式 2.25 において適応フィルタ係数 $h_{ij,L}$ を補正フィルタ係数 $c_{ij,L}$ として与えると、

$$\begin{aligned} y_{j,L}(t) h_{ij,L}^T(t) &= x_{j,L}(t) h_{ij,L}^T(t) \\ y_{j,L}(t) &= x_{i,L}(t) \end{aligned} \quad (2.26)$$

となる。これより、入力誤差 $e(t) = 0$ でなるならば、補正フィルタへの入力信号 $x_j(t)$ と観測信号 $y_j(t)$ は等しくなる。したがって、入力誤差 $e_{ij}(t)$ が最小になるように適応フィルタ

2.8 適応フィルタの更新

の係数を更新していく必要がある．そこで係数更新には

$$h_{ij,L}(t+1) = h_{ij,L}(t) + \alpha \frac{y_{j,L}(t)}{\|y_{j,L}(t)\|^2} e_{ij}(k) \quad (2.27)$$

で示される学習同定法を用いる．ここで、 $y_{j,L}(t)$ は入力状態ベクトル、 $h_{ij,L}(t)$ は適応フィルタのフィルタ係数であり、 $\|\cdot\|$ はベクトルのユークリッドノルムを表す．また α はステップゲインと呼ばれ、フィルタ係数の修正量を制御するパラメータである．

2.8 適応フィルタの更新

補正フィルタの係数を求めるために、学習同定法に基づいて適応フィルタを更新する．次式を入力信号の 1 サンプルデータ毎に繰り返し処理を行うことにより、右側音原が伝達特性 G_{11} 影響を受け通過する信号が所望信号である $x_1(t)$ に近似していくと考えられる．もう一方の入力信号に関しても同様のことが言える．まず、2 つの近似逆フィルタ $H_{ij}(z)$ に対する出力誤差 $e_{ij}(t)$ をそれぞれ以下のように計算する．

$$e_{ij}(t) = d_i(t) - s_{ij}(t) \quad (2.28)$$

次に各逆フィルタ $H_{ij}(z)$ の係数を学習同定法を用いて以下のように算出する．

$$h_{ij,L}(t+1) = h_{ij,L}(t) + \alpha \frac{y_{j,L}(t)}{\|y_{j,L}(t)\|^2} e_{ij}(k) \quad (2.29)$$

ここで、 α はステップゲインである．左右の所望信号に対する補正フィルタ係数 c_i をそれぞれ以下のように更新する．

$$c_{1,L}(t+1) = h_{11}(t) \quad (2.30)$$

$$c_{2,L}(t+1) = h_{22}(t) \quad (2.31)$$

2.9 まとめ

本章では、音場再生システムに用いられる録音方法であるバイノーラル録音、再生空間における逆特性を推定し補正を行う適応信号処理の基礎について説明した．そして、2 つの音

2.9 まとめ

源を用いて 2 点に対して制御を行う 2 チャンネル 2 点制御を説明し，補正サーバにおける適応フィルタの更新について説明を行った．これらを用いて，音源を録音し，適応信号処理により再生環境の受聴点における逆特性を持った信号に補正することができれば，原音場を再現することが可能であることを説明した．

第 3 章

ネットワーク上のリソースによる音場再生システムと問題点

3.1 はじめに

前章までに述べたバイノーラル録音と適応信号処理を用いることで、音場再生を行うことが可能である。しかし、序論でも述べたように実時間音場再生処理のための適応信号処理を行う端末に高性能な処理装置が必要である。そのため、複数の端末で音場再生処理を利用した場合、各端末に高性能な処理装置が必要となり実用的でない。また、スマートフォンなど移動端末の場合、十分な処理能力を持っていても計算量が多くなることで電力の消耗が激しくなってしまう。バッテリーの消耗が激しくなる。

そこで、リスナー側での音場再生処理を必要としない、ネットワーク上のリソースを用いた分散処理による音場再生処理システムが提案されている。

本章では、ネットワーク上のリソースによる音場再生システムの全体構成を示し、従来の処理手法について述べ、このシステムにおける問題点を挙げている。

3.2 システムの構成

本システムの構成を図 3.1 に示す。本システムはリスナーであるクライアント端末と音場再生処理を行うためのサーバ端末から構成され、端末間は TCP/IP ネットワークで接続する。サーバは再現すべき音源を適応フィルタによって補正を行う補正サーバとクライアント

3.2 システムの構成

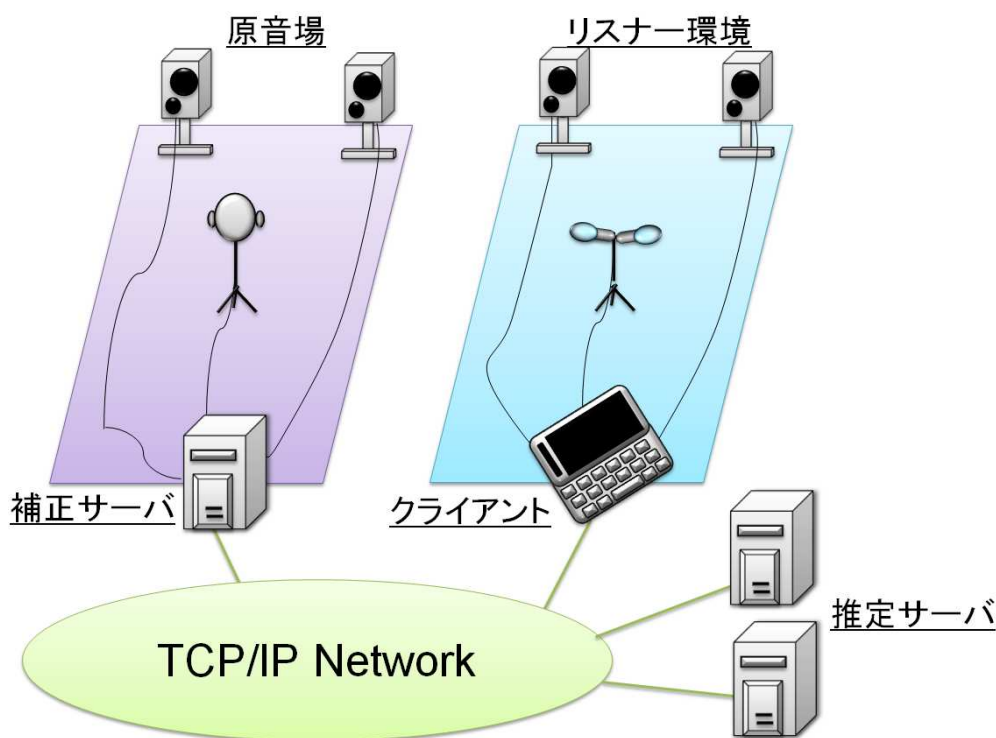


図 3.1 音場再生システムの構成

環境を推測し逆特性を持たせることのできるフィルタを計算する推定サーバがある。

本システムにおいて、2種類のサーバが必要となるが、補正サーバ端末でフィルタ係数の更新を行う推定サーバの処理を行わせることが可能である。つまりサーバは最低1台以上の端末から構成される。そのためシステムの最小構成時の端末数は、クライアント端末と補正及び推定サーバの2台である。

端末以外に必要な装置は、サーバ端末が音源を保持していない場合、要するにリアルタイムで音声をクライアントに配信する場合は、配信する音声を録音する必要があるので、音源とバイノーラル録音のためのダミーヘッドが必要となる。なお図 3.1 において音源は、原音場に存在するスピーカから発生する。再現すべき音源を端末内に保持している場合は、サーバ側はサーバ端末のみでよい。クライアント側はサーバから受信した音声を再生するためのスピーカと再生音を観測するためのマイクが必要となる。

また、図 3.1 のように必ずしも補正サーバが原音場に存在している必要はない。

3.3 システムにおける処理の流れ

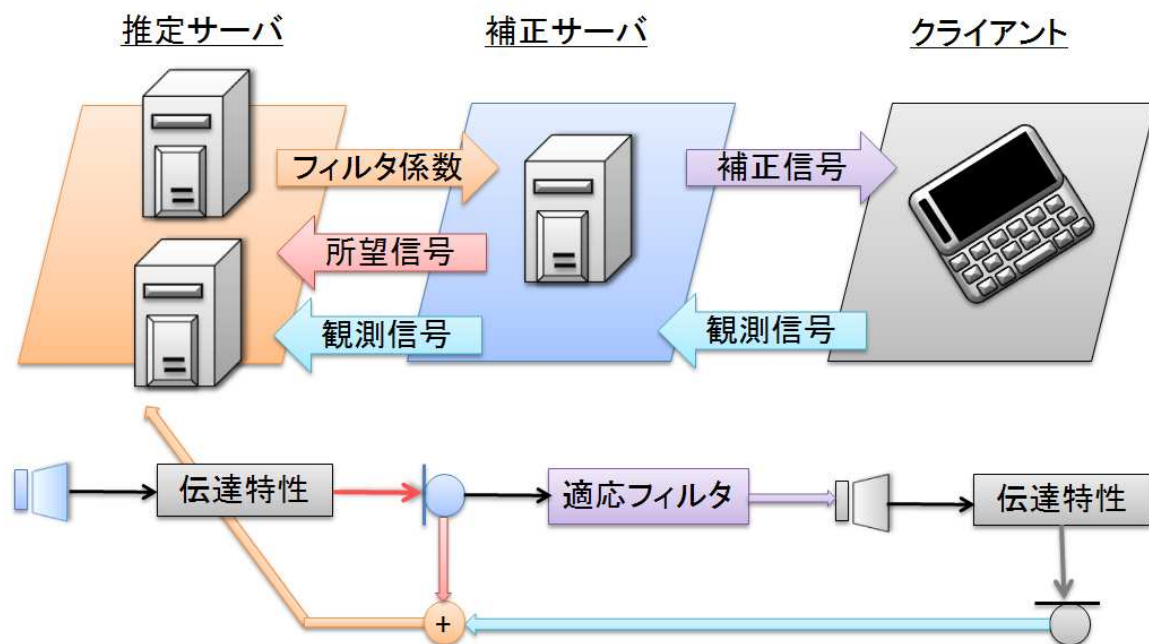


図 3.2 音場再生システムにおける処理の流れ

3.3 システムにおける処理の流れ

ネットワークを利用した音場再生処理システムの処理の流れを図 3.2 に示す。ライブ中継などリアルタイムでリスナーに音声を提供したい場合は、まず、システムが稼働を始めると補正サーバがダミーヘッドから音源の録音を開始し、所望信号となる原音を観測し、リスナーに送り始める。補正サーバが所望信号となる原音を所持している場合はそのままリスナーに送信する。この際は補正サーバは初期値の適応フィルタを用いる。そして、リスナーであるクライアント側は受け取った信号から音声を再生し、クライアント側のマイクによる録音を開始し、観測信号とする。次にクライアントが観測信号を補正サーバに送信し、計算資源となる推定サーバが存在する場合は、補正サーバが受け取った観測音を推定サーバにさらに送信する。そして、推定サーバが受信した観測信号と所望信号から適応信号処理により、リスナーの環境における逆システムを推定し、補正フィルタのパラメータを更新する。補正フィルタは、更新された補正フィルタを用いて所望信号を処理し、クライアントに送信する。そして、クライアントが補正サーバからフィルタリングされた補正信号を受信し、再

3.4 遅延による問題

生することでリスナー側の伝達特性を取り除く。

このような処理によって、原音場つまり録音環境における伝達特性のみの影響を受けた音声をクライアントに届けることが可能となり、リスナーに音場再生処理を行わせないネットワーク分散音場再生システムを実現している。

3.4 遅延による問題

前節で説明したような処理が従来のシステムにおいては行われている。しかし、従来のシステムは、ネットワーク通信やサウンドデバイスによって発生する可能性のある遅延が考慮されていない。

システムにおいては、補正サーバがクライアントに補正信号を送信、クライアントが補正サーバに観測信号を送信、クライアントが受信した音声を再生及び録音のためのサウンドデバイスの通過といった処理が最低限必要なため遅延の影響を無視することは現実的ではない。さらに推定サーバを補正サーバとは別端末にする場合や、録音環境で録音したものをリアルタイムでクライアントに提供した場合などはさらに遅延が発生する要因が増えることになる。そのため、システム稼働時にいずれかの処理において遅延が発生し、その影響を受けると推定サーバにおいて、逆特性を持つ適応フィルタの計算時に所望信号と観測信号のタイミングがずれてしまい、2つの信号の同期をとることができなくなってしまう。

その結果、適応フィルタの係数を正確に推定することができず、観測信号と所望信号の誤差が大きくなってしまい、システムが安定した音場再生処理をクライアントに提供することができなくなってしまうという問題がある。

3.5 まとめ

本章では、ネットワーク上のリソースによる分散音場再生処理システムの構成と分散音場再生のための処理の流れを示した。また、従来のシステムでは遅延による影響を考慮していないため、遅延が発生することで所望信号と観測信号の同期が取れなくなる問題を示した。

3.5 まとめ

加えて，同期が取れなくなることによりリスナー環境の逆特性推定精度が低下してしまう影響について述べた．

第 4 章

遅延の影響を軽減するための手法提案と評価

4.1 はじめに

本章では前章で説明したシステムの問題点である遅延のうち端末間のネットワーク通信による遅延とサウンドデバイスの処理による遅延の影響を軽減するための対策手法を提案する。また、計算機シミュレーションにより従来手法と提案手法の性能評価を行う。

4.2 遅延対策を行う新たな手法の提案

従来のシステムは遅延によって所望信号と観測信号の同期が取れなくなり正確に適応フィルタが更新できなくなるという影響を受けてしまうため、遅延を検知し、そしてその際に遅延に対する処理を施すことでクライアントに対して、より安定したシステムを提供することができると考えられる。サウンドデバイスによる遅延検知とネットワーク通信による遅延検知、そして、逆特性推定の安定性の向上が見込める事前の対策についてそれぞれ述べる。

4.2.1 ネットワーク通信による遅延に対する対策

ネットワーク通信による遅延の発生は、各サーバ間において信号を送受信する際の通信時間によって生じる。そこでネットワーク通信に要した時間とサンプリングレートをを用いて発生した遅延を求める。求めるための手法を補正サーバとクライアント間における補正信号と

4.2 遅延対策を行う新たな手法の提案

観測信号のやりとりを用いて示す。また、その際の処理の流れを図 4.1 に示す。

まず、補正サーバは補正信号を送り始めると同時にその際の時刻 t_1 を記録する。そして、クライアントがデータを受信し終えた時刻時刻 t_2 を記録する。この 2 つの時刻 t_1, t_2 から送信にかかった時間 T_{tra} を求める。次に、補正サーバは補正信号を送信した際と同様の手順で、クライアントから観測信号を受信し始めた時刻 t_3 と観測信号を受信し終えた時刻 t_4 から受信にかかった時間 T_{rev} を求める。さらに $T_{tra} + T_{rev}$ とすることでネットワーク通信に要した時間を求めることができる。そこに式 4.1 に示すように、サンプリングレートを掛けることでネットワーク通信による遅延の信号数を求めることが可能となる。

$$(T_{tra} + T_{rev}) * \text{サンプリングレート} \quad (4.1)$$

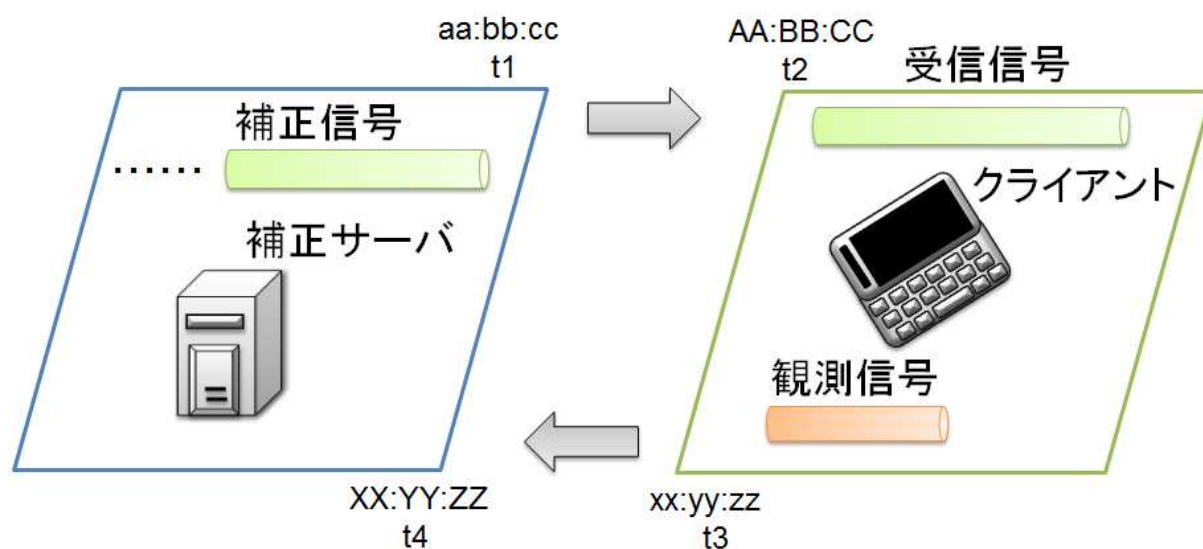


図 4.1 ネットワーク通信による遅延の検知処理

4.2.2 サウンドデバイスによる遅延に対する対策

サウンドデバイスにおける遅延は、まずデバイスの処理時間による遅延がある。さらに、サウンドデバイスの処理によって入力信号が変化し信号数が増減することが考えられる。そこで、サウンドデバイスのバッファサイズを用いる。通常、サウンドデバイスは指定されているバッファサイズごとに処理を行う。そこで、サウンドデバイスに入力する信号数とサウ

4.2 遅延対策を行う新たな手法の提案

ンドデバイスが出力した信号数を比較することでどれだけ変化するかを観測することが可能である．これに加えて処理に要した時間を用いてサウンドデバイスの遅延を求める．この際の処理の流れを 4.2 に示す．

まず，補正信号を受信し，サウンドデバイスに入力し始めた時刻を T_{in} 記録しサウンドデバイスが入力信号のバッファを出力し終えた時刻を T_{out} 記録する．この2つ時刻 T_{in} , T_{out} からデバイスが処理に要した時間を求める．そして，サンプリングレートをかけることで，処理によって発生した遅延を求める．次に，クライアント側のサウンドデバイスのバッファサイズであるサウンドデバイスに入力した信号数 sig_{in} とサウンドデバイスを通して出力された信号数 sig_{out} を用いて $sig_{out} - sig_{in}$ を計算することでサウンドデバイスによって変化した信号数を求める．その結果，式 4.2 に示すように，これらを用いてサウンドデバイスにおける遅延の信号数を求めることが可能となる．

$$(T_{in} + T_{out}) * \text{サンプリングレート} + (sig_{out} - sig_{in}) \quad (4.2)$$

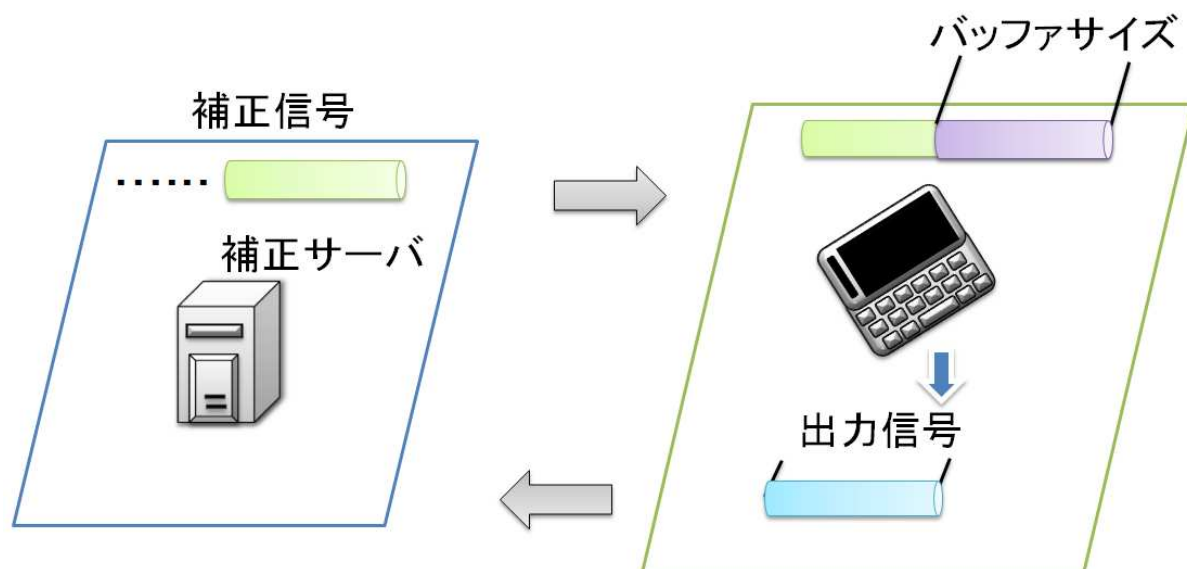


図 4.2 サウンドデバイスによる遅延の検知処理

4.2 遅延対策を行う新たな手法の提案

4.2.3 安定性向上のための事前対策

遅延の検知及びその処置以外の安定した音場再生処理のための手法について述べる。

事前受信による信号数の確保

クライアントは TCP/IP ネットワークを介して補正信号を受信し再生するため、ネットワーク遅延などの影響でクライアントに補正信号が入って来るのが遅れると再生の連続性が失われてしまう。通信速度が遅いネットワークにおいてはなおさら顕著となる。そこで、図 4.3 のように、あらかじめクライアント側でサウンドデバイスが要求するデバイスバッファ以上の補正信号を受信しておくことで、読み込んでおいた信号数の分は遅延が起こっても問題なくクライアントは音声をとぎれることなく再生することが可能となる。ただし、サーバ側で音源をリアルタイムで録音しクライアントに送信している場合は、クライアントが予め受信してバッファとしてある時間分だけサーバ側と差が生じてしまう。

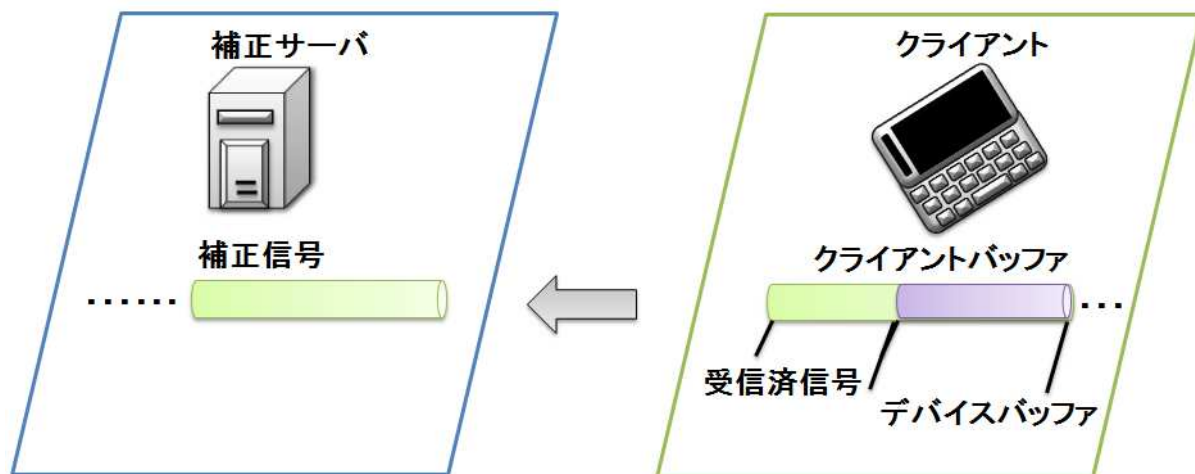


図 4.3 事前受信による信号数の確保のための処理

4.3 ネットワーク通信における遅延対策のシミュレーションによる評価

事前フィルタ推定

従来の手法だとシステム推定はリスナー側の再生がはじまり観測信号の受信がした後ではじまる．そのため，システム稼働時は適応フィルタによる補正が行われない．そこで，システムを本稼働させる前に仮稼働としてシステムを動作させ，あらかじめ適応フィルタを推定しておく．そうすることで，フィルタの初期値として利用することでフィルタをリセットした際に，本稼働時に初期信号から補正を行うことが可能となる．ただし，事前フィルタを推定してもクライアントの環境が変化しやすい場所の場合は逆効果となることも考えられるため，環境の変化しにくい場所でシステムを稼働する際に有用であると考えられる．

フィルタ係数の再設定

推定サーバに十分なリソースを確保できる場合は，次のような方法も考えられる．まず，推定サーバは，実時間で受信する観測信号を用いてリスナー環境のシステムを推定し適応フィルタの係数を更新する．この際に過去の信号としてある程度の信号を保持しておき，音場再生処理が正常に行えなくなった際にフィルタのパラメータをリセットする際に，初期値に戻すわけではなく，保持していた信号を用いてクライアント側の逆システムを推定し，それをパラメータとして渡すことで，より早く音場再生処理をクライアントに提供することが可能である．

4.3 ネットワーク通信における遅延対策のシミュレーションによる評価

提案手法のうちネットワーク通信における遅延の検知法を用いた場合と従来の手法で計算機シミュレーションによる比較を行いその結果を示す．

4.3 ネットワーク通信における遅延対策のシミュレーションによる評価

4.3.1 シミュレーション環境

TCP/IP ネットワークにおいて遅延がランダムに発生する状態で、従来の手法と遅延への対策を考慮した提案手法の比較を行った。入力信号が正弦波と人間の話し声の場合の2通りの入力信号でシミュレーションを行う。また、本シミュレーションでは、推定サーバと補正サーバは複数台用意せずに1台の端末が信号補正及び適応フィルタ係数の計算を行う。

4.3.2 シミュレーション条件 1

まず、正弦波を入力として、従来手法と提案手法を用いた場合の計算機シミュレーションを行う。音源の詳細は表 4.1 の通りとなっている。図 4.4 に所望信号と観測信号の誤差のグ

表 4.1 使用した音源

入力信号	440Hz 正弦波
外乱信号	白色雑音
サンプリングレート	44.1kHz
量子化ビット	16 bit

ラフを示す。また、誤差の平均と誤差の分散を用いて評価を表 4.2 に示す。

表 4.2 シミュレーション結果 (条件 2)

	従来手法	提案手法
誤差平均	0.036046	0.021559
誤差分散	0.001448	0.000251

4.3.3 シミュレーション条件 2

次に人間の話し声を入力信号として従来手法と提案手法を用いた場合の計算機シミュレーションを行う。音源の詳細は表 4.3 の通りとなっている。また、このシミュレーションでも、

4.3 ネットワーク通信における遅延対策のシミュレーションによる評価

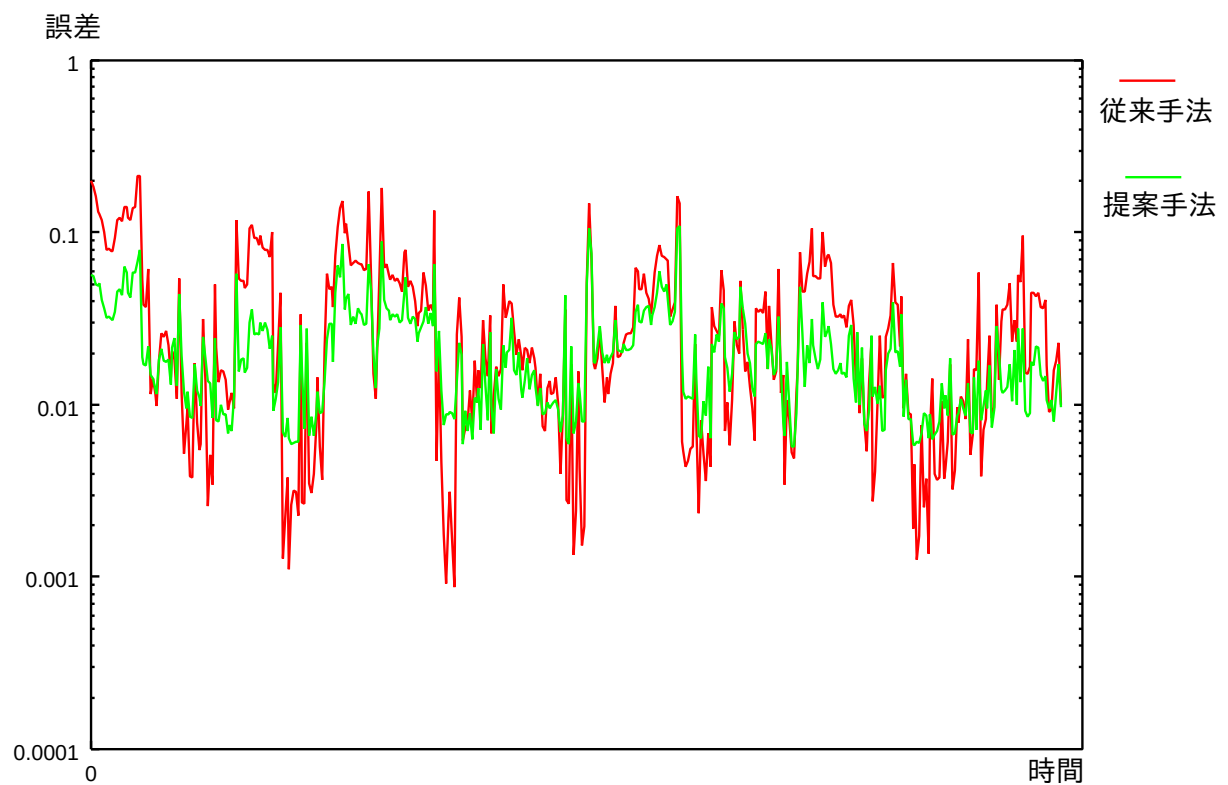


図 4.4 シミュレーション条件 1 時の所望信号と観測信号の誤差

シミュレーション 1 と同様に推定サーバと補正サーバは複数台用意せずに 1 台の端末が信号補正及び適応フィルタ係数の計算を行う。

表 4.3 使用した音源

入力信号	人間の話し声
外乱信号	白色雑音
サンプリングレート	44.1kHz
量子化ビット	16 bit

シミュレーション条件 1 と同様に所望信号と観測信号の誤差のグラフを図?? に示し、所望信号との誤差の平均と誤差の分散を計算した結果を表 4.4 に示す。

4.3 ネットワーク通信における遅延対策のシミュレーションによる評価

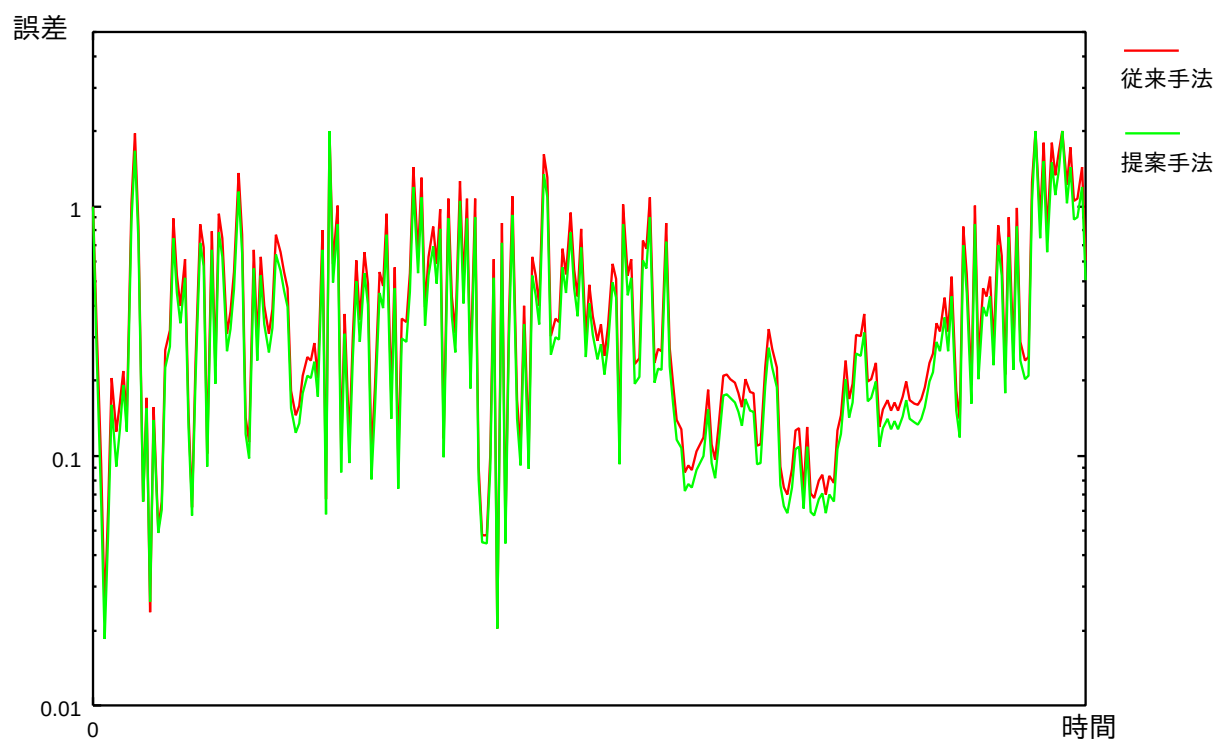


図 4.5 シミュレーション条件 2 時の所望信号と観測信号の誤差

表 4.4 シミュレーション結果 (条件 2)

	従来手法	提案手法
誤差平均	0.407995	0.345433
誤差分散	0.139314	0.106258

4.3.4 シミュレーション結果

どちらの場合も従来の手法に比べ提案手法を用いた場合、誤差平均、分散ともに値が小さくなっており、より安定した音場再生を提供することができている。条件 1 では、従来の手法に比べ提案手法を用いた場合は誤差平均、分散ともに小さくなっており、より原音に近づけることができている。一方、条件 2 の場合、従来手法よりも提案手法の方が誤差の平均、分散ともに小さくはなっているものの条件 1 ほど顕著でなく、従来手法と同程度の性能しか発揮できていないことがわかる。

4.4 まとめ

その理由として、遅延に対する影響は若干受けにくくなっているものの逆特性の推定アルゴリズムに差はないため、一旦適応フィルタの誤差が大きくなってしまうと再び収束するまでに同程度の信号数が必要となるためであると考えられる。

4.4 まとめ

本章では、ネットワークを用いた実時間音場再生処理システムにおける問題点である遅延に対する対策手法を提案し、サウンドデバイスによる遅延検知、ネットワーク通信による遅延検知について述べた。また、事前フィルタ推定やクライアント再生用のバッファなど安定したシステムのための対策について述べた。

また、従来の手法と提案手法を用いた場合の計算機シミュレーションを行い、誤差の平均と分散を用いて比較を行った。

第 5 章

複数の適応フィルタを用いた分散音場再生処理システム

5.1 はじめに

前章までネットワーク上のリソースを利用した分散音場再生処理システムについてシミュレーションを行った。しかし，正弦波を用いて行った結果と比較すると実際の環境に近い人間の話し声によるシミュレーション逆特性の推定精度が大きく低下してしまった。その原因としては，実際の音声は正弦波のような単純な波ではないということに加え，適応フィルタが発散してしまうと再び収束するまでに時間がかかることが挙げられる。場合によっては提案手法の方が収束速度や逆特性の推定精度が低下してしまう場合もある。

そこで，本章では，より安定した逆特性の推定を行うために，高速ネットワーク通信による複数の適応フィルタを使用した音場再生処理手法を提案している。また，計算機シミュレーションを行い，提案手法の効果を検証する。

5.2 複数の適応フィルタを用いた逆特性の推定

現在の手法では，補正サーバは適応フィルタを 1 つしか保持しない。そのため，適応フィルタの推定精度が下降しだすとそれを防ぐことができない。

そこで，本システムはネットワーク上の端末を計算資源として利用ができるため，図 5.1 のように適応サーバにおいて複数の適応フィルタを用いて，現在の状況に置いて最良のもの

5.3 複数の適応フィルタを用いた場合の計算機シミュレーション

を選択し，使用することで逆特性の推定精度向上を計ることが可能である．

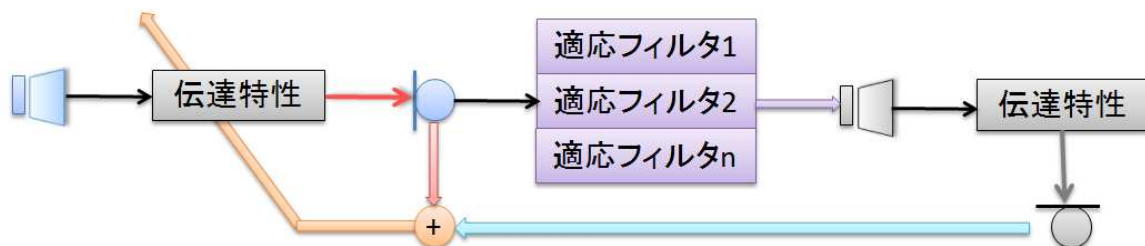


図 5.1 複数の適応フィルタを用いた逆特性の推定

しかし，適応フィルタの数が増えることにより，推定サーバ及び補正サーバ間の通信回数がおよそフィルタ数倍となる．そのため，今まで以上のネットワーク間における高速通信が要求されるという問題点がある．

一方，補正サーバが逆特性の推定のための通信を行う推定サーバが増加する以外の処理の流れは基本的に前章で提案した手法と同様である．もう一点，異なる点としては複数の適応フィルタの中から所望信号と観測信号の誤差から使用するフィルタを判断するということがある．

また，複数のフィルタを持っても全てが同じ入力で同じ処理をしてしまうと全てのフィルタが同じものになってしまう．そこで，フィルタ毎に差をつける必要がある．次節で複数の適応フィルタを用いてシミュレーションを行う．

5.3 複数の適応フィルタを用いた場合の計算機シミュレーション

本節では複数の適応フィルタを用いた場合のシミュレーションを行う．なお，サーバ間およびクライアント間における通信速度に関しては十分な通信速度が確保されているとする．

本シミュレーションでは複数の適応フィルタを使用するが，それぞれのフィルタの更新方

5.3 複数の適応フィルタを用いた場合の計算機シミュレーション

法は次のように行う。まず，逆特性の推定精度が低下している判断するための閾値を用意する。そして，観測信号と所望信号の誤差が閾値を越えたときにフィルタの逆特性の精度が下がっていると判断する。その際に，フィルタ毎の方針に沿ってフィルタ係数を変更する。本シミュレーションでは4つの適応フィルタを使用し，各フィルタの方針は以下のようにする。

フィルタ 1 1つのフィルタを更新し続ける

フィルタ 2 フィルタ 1 を利用した誤差が閾値を超えるとフィルタを初期化する

フィルタ 3 フィルタ 1 のうち最も誤差の小さくなった値を保持し閾値を超えると保持した値に適応フィルタの係数を変更する

フィルタ 4 フィルタ 1 のうち最も誤差の大きくなった値を保持し閾値を超えると保持した値に適応フィルタの係数を変更する

この4つの適応フィルタを用いて計算機シミュレーションを行った。なお補正サーバが信号補正を行う際のフィルタの選択方法は前回のフィルタ更新時に最も値がよかったものを選択する。利用した音源は表 5.1 に示しているように入力信号である所望信号は人間の話し声であり，外乱信号として再生時の室内の環境音を与える。

表 5.1 使用した音源

入力信号	人の話し声
外乱信号	室内環境音 (主にエアコン)
サンプリングレート	44.1kHz
量子化ビット	16 bit

シミュレーションの結果は図 5.2 の示すようになった。また，表 5.2 に誤差の平均と分散を示す。シミュレーションの結果から従来手法と比較すると適応フィルタを複数用いて音場再生処理を行った方が所望信号との誤差が小さくなっていることがわかる。このことから，複数の適応フィルタを用いることが有用であることが示される。また，フィルタの数を増やすことによってさらに誤差を小さくすることが可能であると考えられる。

5.3 複数の適応フィルタを用いた場合の計算機シミュレーション

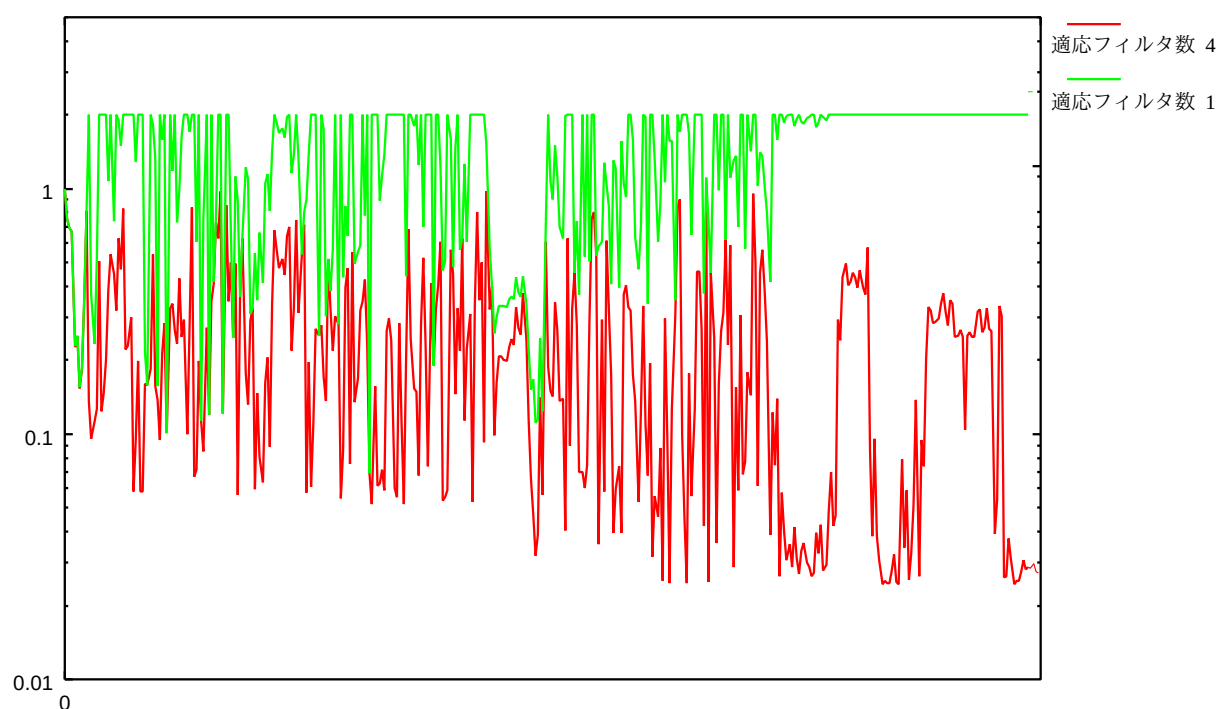


図 5.2 複数の適応フィルタを用いたシミュレーション結果

表 5.2 シミュレーション結果

	単体の適応フィルタ時	複数の適応フィルタ時
誤差平均	1.443995	0.242619
誤差分散	0.467520	0.044883

従来手法と比較すると適応フィルタを複数用いて音場再生処理を行った方が所望信号との誤差が小さくなっていることがわかる。このことから、複数の適応フィルタを用いることが有用であることが示される。また、フィルタの数を増やすことによってさらに誤差を小さくすることが可能であると考えられるが適応フィルタの数が増えるほどより多くの計算資源が必要かつ安定した通信速度が必要となる。

5.4 まとめ

本章では，ネットワーク上のリソースによる分散音場再生処理において，高速ネットワークを用いることで実現可能と考えられる逆特性推定性能を向上させる手法について提案した．また，計算機シミュレーションによって，単体の適応フィルタによる場合と複数の適応フィルタによる場合の所望信号との誤差平均及び誤差分散を示すことで手法の有効性を示した．

第 6 章

結論

6.1 まとめと今後の課題

本研究では、ネットワーク上のリソースによる音場再生処理における新たな処理手法を提案した。従来の分散処理手法では、様々な箇所に置いて発生する可能性のある遅延による対策を講じていなかった。そのため、所望信号と観測信号にズレが生じ、適応フィルタの精度を安定して保つことができなかった。そこで、サウンドデバイス及びネットワーク通信による遅延を考慮した対策を提案した。これにより、サウンドデバイスもしくはネットワーク通信において遅延が発生した場合に、サーバは遅延の発生を知ることが可能となり、適宜処理を行うことが可能となる。

また、予めクライアントにサーバからの信号を受信する時間を与えることでクライアントが所持する信号数に余裕をもたせ、通信による遅延が発生しても予め与えた信号分は再生の連続性を保つ手法及び事前にフィルタを推定することでリスナーの音場における特性の変化が小さい環境で効果的に利用できる手法の安定性向上のための手法を提案した。これらの処理手法を用いることにより、より安定した音場再生処理をクライアントは利用する可能である。

そして、従来の処理手法と提案したネットワーク通信時の遅延検知及び処置を行う提案手法を用いて計算機シミュレーションを行い、平均誤差と誤差分散が提案手法を用いた方が小さくなることを確認した。これより、提案手法の有用性を示した。

ネットワーク通信の遅延だけではなく、その他の提案している対策を用いることでさらに誤差平均及び分散を小さくすることが可能であると考えられる。しかしながら、完全に所望

6.1 まとめと今後の課題

信号と観測信号の同期を取るのは困難であり，徐々に様々な箇所で発生する遅延による影響が大きくなってしまう場合がある．そのような場合における対策についてさらに考える必要があり，その対策を講じることでより安定した音場再生をリスナーであるクライアントに提供することが可能である．

さらに，ネットワーク上の計算資源を活かして，複数の適応フィルタを稼働させることで逆特性の推定精度を向上させる手法を提案した．そして，計算機シミュレーションによって有効性を示した．しかし，この手法は数サンプル毎での処理が好ましいため，遅延の影響を無視できるようなより高速なネットワークを想定している．

今後の課題としては，現在，遅延対策として稼働しているのはネットワーク通信における箇所だけなので，さらにサウンドカードなどの信号を処理するサウンドデバイスに対する対策を実装するということである．また，スピーカやマイクなどの影響を考慮していないため，それらについても考慮の必要があるのか検証すべきである．そして，現状のネットワーク通信性能において，より精度の高い音場再生処理をリスナーに提供することを目指す．

謝辞

6.2 謝辞

本研究を行うにあたり，主指導教官であり，研究室での指導にあたって頂いた福本昌弘教授に厚く御礼申し上げます。相変わらずメ切を守らない私でしたが，自主性を尊重していただいたおかげで失踪することなく修論を書き上げることができました。

副査をしていただいた浜村昌則准教授，吉田真一講師にも厚く御礼申し上げます。特に吉田講師には公私にわたり様々な知識やアドバイスをいただきました。有事の際に活用させていただきます。

佐伯幸郎助教と福富英次助教には研究室内外にとどまらず大変御世話になりました。お二人に厚く御礼申し上げます。佐伯さんの華麗な話術と福富さんの的確なツツコミに羨望の眼差しを向けられずにはられませんでした。

また，研究室で共に研究を行ったり行わなかったりした学部4年生の安藝君，奥本君，堀本君，松谷君，舟橋君 他にも感謝します。とくに奥本君の眠りの深さには感服しました。そして，主に食を支えていただいた吉田研究室の方々に御礼申し上げます。

最後に，この研究を行うにあたって係わった全ての方に感謝致します。

参考文献

- [1] 山田良, ネットワーク上のリソースを活用した実時間音場再生システムの構築, 高知工科大学, 2007
- [2] 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
- [3] 辻井重男, 鎌田一雄, デジタル信号処理, 昭晃堂, 1990
- [4] 山崎芳男 金田豊, 音・音場のデジタル処理, コロナ社, 1999
- [5] 北脇信彦, デジタル通信・オーディオ技術, 電器通信協会, 1999
- [6] 藤井佑一, DSP による多入力信号補正システムの構築法, 平成 15 年度 学士学位論文, 2003.
- [7] Jeff Tranter, Linux マルチメディアガイド, オライリージャパン, 1997.
- [8] 徳久翔太, 佐伯幸郎, 福本昌弘, ネットワークを利用した実時間音場再生システム, IEICE SIP Symposium 2010, P2-15, Nov 2010.
- [9] 電子情報通信学会, デジタル信号処理ハンドブック, オーム社, 1993.
- [10] W. リチャード・スティーブンス, UNIX ネットワークプログラミング Vol.1, 株式会社ピアソン・エデュケーション, 1999. /
- [11] 田辺義和, “Windows サウンドプログラミング”, 翔泳社, 2001.
- [12] 浜崎信二, 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, Vol.104, No.559, pp.31-36, Jan.2005.
- [13] 岡部馨, “ダミーヘッドを用いた音場再生”, 日本音響学会誌, Vol.46, No.8, pp.650-656, 1990.