

平成 26 年度
学士学位論文

非定常雑音抑圧に特化した音響エコーキャン
ンセラ

**An acoustic echo canceller that specializes in
non-stationary noise suppression**

1150358 星野 浩希

指導教員 福本 昌弘

2015 年 3 月 4 日

高知工科大学 情報学群

要 旨

非定常雑音抑圧に特化した音響エコーキャンセラ

星野 浩希

遠隔会議において、受話者側のスピーカから拡声された音声をマイクロホンが收音し、送話者のスピーカで拡声される音響エコーは、会話の妨げとなる。そのため、遠隔会議では音響エコーキャンセラが用いられる。会議ではパソコンの操作音や資料をめくる音など、卓上で非定常雑音が生じることが想定される。音声と同時に雑音が收音されることにより、エコー抑圧処理性能が劣化する。そのため、遠隔会議で用いられる音響エコーキャンセラは雑音抑圧処理の併用が必要となる場合がある。

一般的な雑音抑圧処理技術として、単一マイクロホンを用いた雑音抑圧処理技術が挙げられる。雑音の定常性を利用し、雑音と音声混ざった入力信号のスペクトルから、雑音信号のスペクトルを引くことにより、雑音の抑圧が可能となる。雑音の定常性を利用していることから、遠隔会議で生じる非定常雑音の抑圧ができない。

本研究では、垂直に並べた2つのマイクロホンを用いた雑音抑圧処理を行っている。人の発話と卓上で生じる非定常雑音の音源位置の違いから、雑音のみの抑圧が可能であるかの検証を目的としている。雑音抑圧手法は、各マイクロホンに雑音が到達する時間差を推定し、信号の減算処理により雑音を抑圧している。垂直に並べた2つのマイクロホンを用いた雑音抑圧実験によって、反射音が発生しない場合では、非定常雑音および定常雑音の抑圧ができていることを確認している。また、人の発話に雑音が混入した場合でも、雑音のみ抑圧ができていることを確認している。しかし、反射音が発生した場合は雑音抑圧処理の効果がみられなかった。

キーワード 音響エコーキャンセラ, 相互相関, 到達時間差, 非定常雑音抑圧

Abstract

An acoustic echo canceller that specializes in non-stationary noise suppression

HOSHINO Hiroki

In a remote conference, acoustic echo interrupts a conversation. For remove acoustic echo, an acoustic echo canceller is used in a remote conference. It is supposed that a non-stationary noise such as sounds of typing keyboard and turning over documents occur in the desk. The performance of acoustic echo suppression techniques are decreased by occurring a non-stationary noise. Therefore, acoustic echo suppression techniques and noise suppression techniques are necessary for a remote conference is performed comfortable.

There are noise suppression techniques using a single microphone. In this method, noise can be suppressed using a frequency spectrum of a noise signal. However, this noise suppression is used stationarity of the noise. Therefore, non-stationary noise can not be suppressed.

In this paper, noise suppression techniques using two microphones which is aligned vertically has been proposed and evaluated by the experiment. The purpose of experiment is suppressed only noise from mixed signals of voice and noise. Those noise suppression techniques are used the difference of sound source position of talker and noise. There is a delay in arrival, when noise signal arrives in each microphones. First, this proposed method estimates a delay in arrival between microphones. Next, Each noise signal is subtracted result using estimated result. Therefore, noise can be sup-

pressed. As results, the proposed method can be suppressed non-stationary noise and stationary noise, if there is no reflected sounds. Moreover, the proposed method can be suppressed only noise from mixed signals of voice and noise.

key words acoustic echo canceller, cross correlation, delay in arrival, non-stationary noise suppression

目次

第 1 章	序論	1
1.1	本研究の背景と目的	1
1.2	構成	2
第 2 章	遠隔会議で用いられる音響エコーキャンセラに必要な雑音抑圧処理	3
2.1	エコー抑圧処理に対して周囲雑音が及ぼす影響	3
2.1.1	音響エコーの発生	4
2.1.2	適応フィルタを併用した音響エコーキャンセラ	5
2.1.3	エコー抑圧処理に対して周囲雑音が及ぼす影響	6
2.2	遠隔会議で用いられる音響エコーキャンセラに必要な雑音抑圧処理	6
2.2.1	雑音抑圧処理を併用した音響エコーキャンセラ	7
2.2.2	単一マイクロホンを用いた短時間スペクトル振幅推定法による雑音 抑圧処理	8
2.2.3	問題点の解決策	9
第 3 章	垂直に並べた 2 つのマイクロホンを用いた非定常雑音抑圧処理	11
3.1	本研究の位置付け	11
3.2	雑音抑圧処理の構成	13
3.3	相互相関法による到達時間差推定	14
3.4	減算処理による雑音抑圧処理	16
第 4 章	垂直に並べた 2 つのマイクロホンを用いた雑音抑圧実験	17
4.1	雑音抑圧実験	18
4.1.1	吸音材を用いた実験	18
4.1.2	吸音材を用いない実験	20

目次

4.2	実験結果	20
4.2.1	吸音材を用いた実験	21
4.2.2	吸音材を用いない実験	30
4.3	考察	34
第 5 章	結論	35
5.1	本論文のまとめ	35
5.2	今後の課題	36
	謝辞	37
	参考文献	38

目次

2.1	ハンズフリー拡声通話の模式図	4
2.2	音響エコーキャンセラの模式図	5
2.3	雑音処理処理を併用した音響エコーキャンセラの構成	7
2.4	短時間スペクトル振幅推定法による雑音抑圧処理構成	9
3.1	話者の声が2つのマイクロホンに到達する時間差	12
3.2	卓上で生じる雑音が2つのマイクロホンに到達する時間差	13
3.3	雑音抑圧処理の構成	14
3.4	2つのマイクロホンで収録される信号	15
3.5	2つのマイクロホンで収録された雑音信号相関値が最大となる時の時間軸 のずれ	16
4.1	吸音材を用いた実験環境	19
4.2	吸音材を用いない実験環境	20
4.3	到達時間差の遅延をなくし位相をそろえたキーボードの打鍵音の音声波形	21
4.4	雑音抑圧処理後のキーボードの打鍵音の音声波形	22
4.5	到達時間差の遅延をなくし位相をそろえた紙をめくる音の音声波形	22
4.6	雑音抑圧処理後の紙をめくる音の音声波形	23
4.7	到達時間差の遅延をなくし位相をそろえた人の発話後にキーボードの打鍵音 が生じた音声波形	24
4.8	雑音抑圧処理後の人の発話後にキーボードの打鍵音が生じた音声波形	24
4.9	到達時間差の遅延をなくし位相をそろえた人の発話後に紙をめくる音が生じ た音声波形	25
4.10	雑音抑圧処理後の人の発話後に紙をめくる音が生じた音声波形	25

図目次

4.11 到達時間差の遅延をなくし位相をそろえた人の発話後にキーボードの打鍵音が生じた音声波形	26
4.12 雑音抑圧処理後の人の発話後にキーボードの打鍵音が生じた音声波形	27
4.13 到達時間差の遅延をなくし位相をそろえた人の発話後に紙をめくる音が生じた音声波形	27
4.14 雑音抑圧処理後の人の発話後に紙をめくる音が生じた音声波形	28
4.15 到達時間差の遅延をなくし位相をそろえたファンの動作音の音声波形	29
4.16 雑音抑圧処理後のファンの動作音の音声波形	29
4.17 2つのマイクロホンで収録された各信号の位相をそろえたキーボードの打鍵音の音声波形	30
4.18 雑音抑圧処理後のキーボードの打鍵音の音声波形	31
4.19 2つのマイクロホンで収録された各信号の位相をそろえた紙をめくる音の音声波形	31
4.20 雑音抑圧処理後の紙をめくる音の音声波形	32
4.21 到達時間差の遅延をなくし位相をそろえたファンの動作音の音声波形	33
4.22 雑音抑圧処理後のファンの動作音の音声波形	33

表目次

4.1 録音に用いた機材	18
------------------------	----

第 1 章

序論

1.1 本研究の背景と目的

遠隔会議において、受話者側のスピーカから拡声された音声をマイクロホンが収録し、送話者のスピーカで拡声される音響エコーは、会話の妨げとなる [2]。そのため、遠隔会議では音響エコーキャンセラが用いられる。会議ではパソコンの操作音や資料をめくる音など、卓上で非定常雑音が生じることが想定される。音声と同時に雑音が収録されることにより、エコー抑圧処理性能が劣化する [3]。そのため、遠隔会議で用いられる音響エコーキャンセラは雑音抑圧処理の併用が必要となる場合がある。

一般的な雑音抑圧処理技術として、単一マイクロホンを用いた雑音抑圧処理技術が挙げられる。雑音の定常性を利用し、雑音と音声混ざった入力信号のスペクトルから、雑音信号のスペクトルを引くことにより、雑音を抑圧が可能となる。雑音の定常性を利用していることから、遠隔会議で生じる非定常雑音の抑圧ができない [1][4][6]。

本研究では、垂直に並べた 2 つのマイクロホンを用いた雑音抑圧処理を行っている。人の発話と卓上で生じる非定常雑音の音源位置の違いから、雑音のみの抑圧が可能であるかの検証を目的としている。各マイクロホンに音が到達する時間差を用いて、各信号の減算処理により雑音を抑圧する [5][6]。遠隔会議において卓上で生じる非定常雑音と人の発話の音源位置の違いから生まれる到達時間差の違いを利用し、非定常雑音のみ抑圧できるか確認する。

1.2 構成

本論文の構成について述べる。

第2章では、音響エコーキャンセラにおいて雑音が及ぼす影響を述べる。エコー抑圧処理性能の劣化を防ぐため、単一マイクロホンを用いた雑音抑圧処理技術を述べる。また、単一マイクロホンを用いた雑音抑圧処理技術を遠隔会議で使用した場合の問題点を挙げる。

第3章では、第2章で挙げた問題点を解決するため、垂直に並べた2つのマイクロホンに音が到達する時間差を利用した雑音抑圧処理技術を述べる。用いた手法として、相互相関を用いた到達時間差の推定と信号の減算処理による雑音抑圧法について述べる。

第4章では、音の到達時間差を用いた雑音抑圧実験を行い、得られた結果から考察する。

第5章では、4章の結果から本論文の結論と今後の課題を述べる。

第 2 章

遠隔会議で用いられる音響エコー キャンセラに必要な雑音抑圧処理

遠隔会議では、スピーカから拡声された音をマイクロホンで收音することで発生する音響エコーは会議の妨げとなる。そのため、遠隔会議では音響エコーを未然に防ぐ音響エコーキャンセラが必要となる。しかし、音響エコーキャンセラは周囲雑音の影響により、エコー抑圧処理性能が劣化するおそれがある。周囲雑音の影響によるエコー抑圧処理性能の劣化の解決策として、雑音抑圧処理を音響エコーキャンセラに併用する必要がある。

本章では、音響エコーキャンセラによるエコー抑圧処理について説明する。また、エコー抑圧処理における周囲雑音が及ぼす影響を説明する。エコー抑圧処理性能の劣化を防ぐため、単一マイクロホンを用いた雑音抑圧処理技術として、音声と雑音の特徴量から雑音抑圧を行う処理について説明する。また、説明した雑音抑圧処理を遠隔会議で使用した場合の問題点を挙げる。

2.1 エコー抑圧処理に対して周囲雑音が及ぼす影響

遠隔会議などのスピーカとマイクロホンを用いて行われる通話で、スピーカから出力された音をマイクロホンで收音することで発生する音響エコーについて説明する。会議の妨げとなる音響エコーを未然に防ぐ適応フィルタを併用した音響エコーキャンセラについて説明する。また、適応フィルタを併用した音響エコーキャンセラの動作に対して遠隔会議で生じると想定される周囲雑音が及ぼす影響を説明する。

2.1 エコー抑圧処理に対して周囲雑音が及ぼす影響

2.1.1 音響エコーの発生

遠隔会議ではスピーカとマイクロホンを用いて通話が行われる。このようなスピーカとマイクロホンを用いて行われるハンズフリー拡声通話の模式図を図 2.1 に示す。図 2.1 においてハンズフリー拡声通話は、送話者の声をマイクロホンで収録し、ネットワークを介してスピーカで拡声され受話者に伝わる。このときスピーカから拡声された音は受話者側のマイクロホンで収録され、送話者に再度戻り、送話者側のスピーカで拡声される。これにより、送話者にとって自分の声がこだまのように聞こえる。この現象は音響エコーと呼ばれ、通話障害や通話品質劣化の要因となる [2]。さらに、スピーカから拡声された音はマイクロホンに収録され、信号の閉ループを形成する。そして、閉ループのゲインが 1 を超えると発振現象、即ちハウリングが発生し通話不能に陥る [2]。遠隔会議において音響エコーは会話の妨げとなるため、音響エコーを未然に防ぐ必要がある。

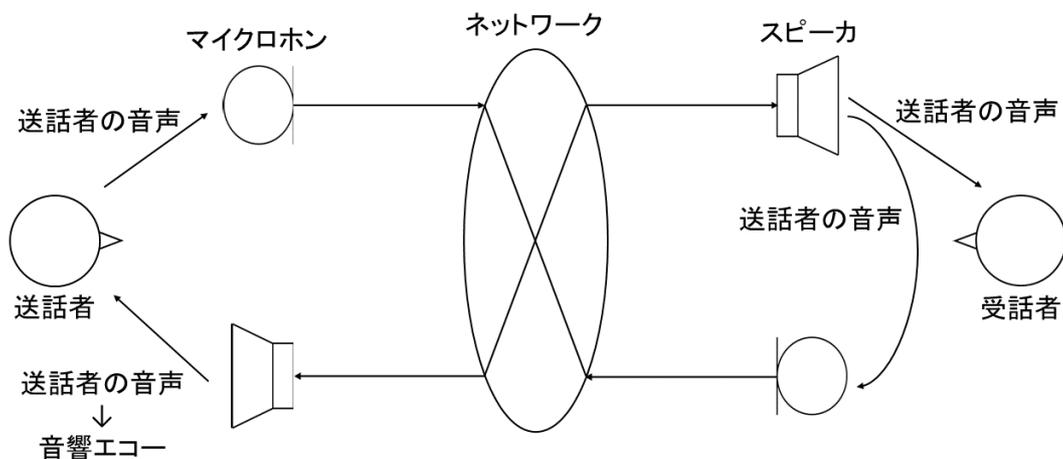


図 2.1 ハンズフリー拡声通話の模式図

2.1 エコー抑圧処理に対して周囲雑音が及ぼす影響

2.1.2 適応フィルタを併用した音響エコーキャンセラ

遠隔会議のようなスピーカとマイクロホンを用いて行われる通話では、音響エコーを未然に防ぐために音響エコーキャンセラが必須となる。適応フィルタを併用した音響エコーキャンセラの動作について図 2.2 を用いて説明する。送話者からの受信信号 $x(k)$ は受話者側のスピーカから拡声され、スピーカからマイクロホン間のインパルス応答 h を介して、音響エコー信号 $y(k)$ としてマイクロホンに收音される。ここで、 k は離散時間を表す。音響エコーキャンセラは、スピーカからマイクロホン間の伝送経路を決めるインパルス応答を適応フィルタで推定し、推定値 \tilde{h} と受信信号 $x(k)$ を畳み込むことで、推定エコー信号 $\tilde{y}(k)$ を生成する。エコー抑圧後の誤差信号を $e(k)$ は、

$$e(k) = y(k) - \tilde{y}(k) \quad (2.1)$$

と表すことができ、マイクロホンで收音された音響エコー信号 $y(k)$ から推定エコー信号 \tilde{y} を差し引くことにより音響エコーの抑圧を行う [2]。

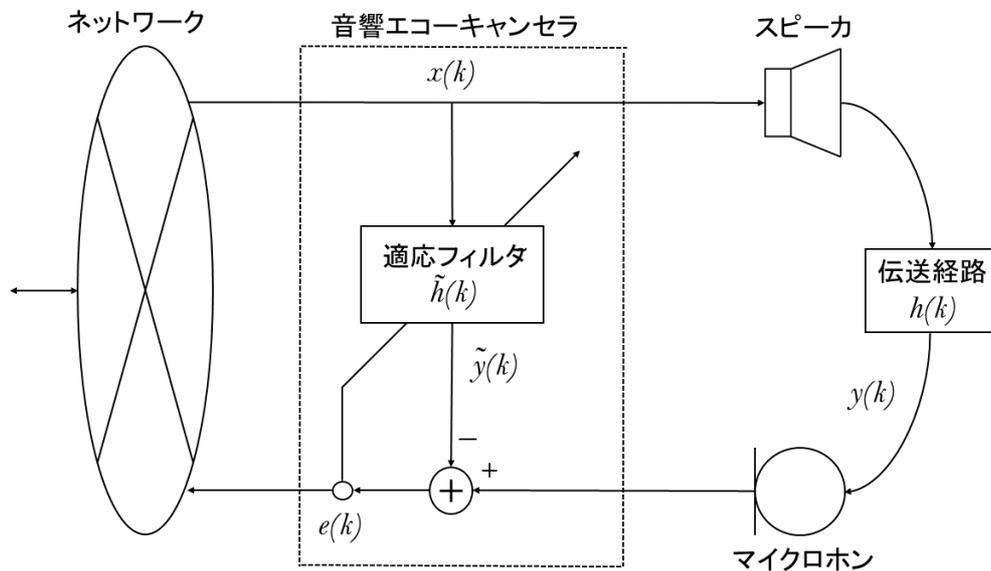


図 2.2 音響エコーキャンセラの模式図

2.2 遠隔会議で用いられる音響エコーキャンセラに必要な雑音抑圧処理

2.1.3 エコー抑圧処理に対して周囲雑音が及ぼす影響

遠隔会議で適応フィルタを併用した音響エコーキャンセラを使用した場合、会議で生じる周囲雑音がエコー抑圧処理に及ぼす影響を説明する。適応フィルタは、受信信号 $x(k)$ が存在するときに、適応アルゴリズムを用いて、エコー抑圧誤差信号 $e(k)$ の誤差が最小となるようなインパルス応答の推定値 \tilde{h} を計算する。エコー抑圧後の誤差信号 $e(k)$ を最小化するフィルタ係数 \tilde{h} はマイクロホンからスピーカ間の伝送経路を決めるインパルス応答の良好な推定値となる。しかし、雑音 $n(k)$ が収録された場合、エコー抑圧誤差信号 $e(k)$ の関係式は、

$$e(k) = y(k) + n(k) - \tilde{y}(k) \quad (2.2)$$

と表され、音響エコーと雑音に相関があるとき同様に抑圧処理を行うと、 $e(k)$ はエコー抑圧誤差とならないため、インパルス応答の推定を行うと推定誤りを生じる。よって、適応フィルタの適応動作の低減もしくは停止となるといった問題点がある [3]。

適応フィルタを併用した音響エコーキャンセラは、静かな会議室で行われる遠隔会議においては、音響エコーが抑圧され有効的に活用することができる。しかし、会議現場では、周囲雑音が生じることが考えられる。このような利用環境において雑音は会話の妨げになるだけでなく、エコー抑圧処理過程において悪影響を及ぼし、通話の品質を劣化させてしまうといった問題点が挙げられる。そこで、雑音抑圧処理を音響エコーキャンセラに併用させることで問題点を解決することができる。

2.2 遠隔会議で用いられる音響エコーキャンセラに必要な雑音抑圧処理

雑音が生じる可能性のある遠隔会議の現場では、2.1.3 で述べた問題点より、適応フィルタを併用した音響エコーキャンセラの動作に悪影響を及ぼし、通話の品質を劣化させてしまう。よって、雑音抑圧処理を音響エコーキャンセラに併用する必要がある。

雑音抑圧処理を併用した音響エコーキャンセラについて説明する。単一マイクロホンを用

2.2 遠隔会議で用いられる音響エコーキャンセラに必要な雑音抑圧処理

いて、音声と雑音の特徴量から雑音抑圧する短時間スペクトル振幅推定法による雑音抑圧処理技術について説明する。また、説明した単一マイクロホンを用いた雑音抑圧処理技術を併用した音響エコーキャンセラを遠隔会議で使用した場合の問題点を挙げ、解決策を検討する。

2.2.1 雑音抑圧処理を併用した音響エコーキャンセラ

雑音抑圧処理を併用した音響エコーキャンセラについて説明する。雑音抑圧処理を併用した音響エコーキャンセラの構成を図 2.3 に示す。話者の音声信号を $s(k)$ 、雑音信号を $n(k)$ 、音響エコー信号を $y(k)$ とすると、マイクロホンの入力信号 $z(k)$ は、

$$z(k) = s(k) + n(k) + y(k) \quad (2.3)$$

と表すことができ、2.1.2 で説明した適応フィルタ処理により、音響エコー信号 $y(k)$ を抑圧する。適応フィルタによる音響エコー抑圧後の信号には雑音信号 $n(k)$ に埋もれた話者の音声信号 $s(k)$ が出力される。そこで、雑音抑圧処理により、雑音信号 $n(k)$ を抑圧することにより、話者の音声だけを抽出することが可能となる [1]。

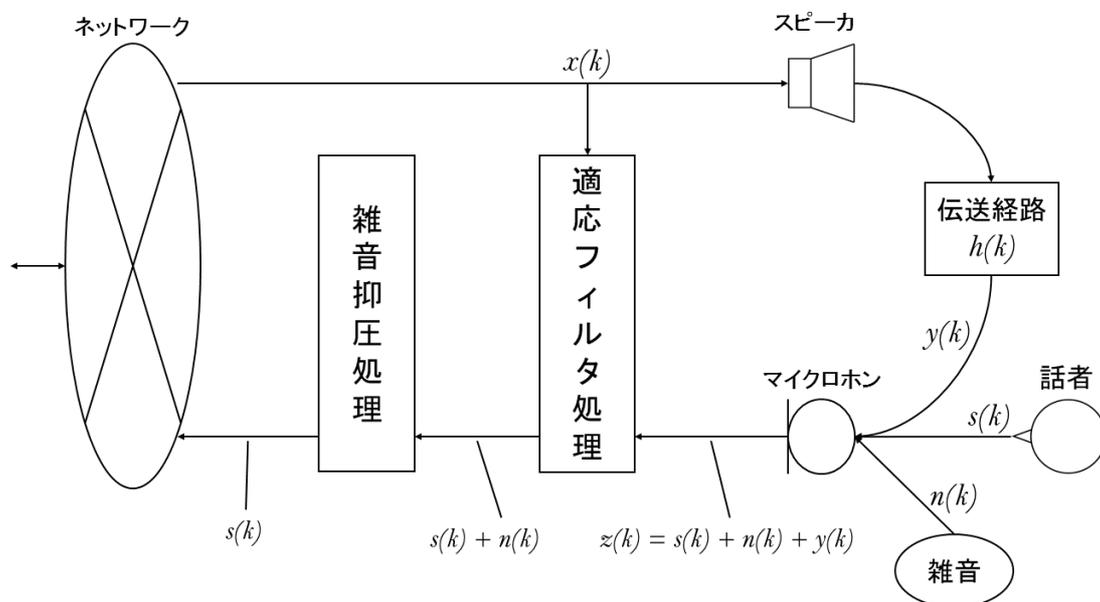


図 2.3 雑音処理処理を併用した音響エコーキャンセラの構成

2.2 遠隔会議で用いられる音響エコーキャンセラに必要な雑音抑圧処理

2.2.2 単一マイクロホンを用いた短時間スペクトル振幅推定法による雑音抑圧処理

周囲雑音によって音響エコー抑圧処理過程に悪影響を及ぼさないように、音響エコーキャンセラに必要な雑音抑圧処理について検討する必要がある。そこで、単一マイクロホンを用いた短時間スペクトル振幅推定法による雑音抑圧処理を説明する。短時間スペクトル振幅推定法では、単一マイクロホンで収録した信号から、雑音の特徴量を推定し、雑音混じりの音声の特徴量から雑音を抑圧する。短時間スペクトル振幅推定法による雑音抑圧処理構成を図2.4に示す。音声信号を $s(k)$ 、周囲雑音を $n(k)$ とすると、入力信号は、

$$za(k) = s(k) + n(k) \quad (2.4)$$

となる。ここで ω を周波数とすると、周波数領域での関係式は、

$$Za_\omega = S_\omega + N_\omega \quad (2.5)$$

となる。雑音抑圧後の出力信号 $y(k)$ の周波数成分は Y_ω は、

$$Y_\omega = Ga_\omega^w \cdot |Za_\omega| \quad (2.6)$$

と表される。短時間スペクトル振幅推定に基づく雑音抑圧処理は、入力信号の短時間スペクトルの振幅成分に非線形ゲイン Ga_ω を重畳して、周囲雑音を抑圧し音声信号を強調する非線形処理である。周囲雑音 $n(k)$ と音声信号 $s(k)$ が無相関であると仮定し、ウィナーフィルタ法を用いると、非線形ゲイン Ga_ω^w は、

$$\begin{aligned} Ga_\omega^w &= \frac{E[|S_\omega|^2]}{E[|S_\omega|^2] + E[|N_\omega|^2]} \\ &= \frac{|Za_\omega|^2 - E[|N_\omega|^2]}{|Za_\omega|^2} \end{aligned} \quad (2.7)$$

で与えられる。ここで $E[|S_\omega|^2]$ 、 $E[|N_\omega|^2]$ は、 S_ω 、 N_ω の集合平均を表す。

雑音抑圧後の出力信号 $y(k)$ の周波数成分を Y_ω とすると、周囲雑音を抑圧する非線形処理は、

$$Y_\omega = (1 - \alpha)Za_\omega + \alpha Ga_\omega^w Za_\omega \quad (2.8)$$

2.2 遠隔会議で用いられる音響エコーキャンセラに必要な雑音抑圧処理

と表される．式 (2.8) では，出力信号 \widetilde{Y}_ω に適切な割合で $1 - \alpha$ で入力信号 Za_ω を付加することにより，音声ひずみをマスクして処理音声の聴覚上の劣化を抑えている．これらの処理により，雑音抑圧が可能となっている [4][6]．

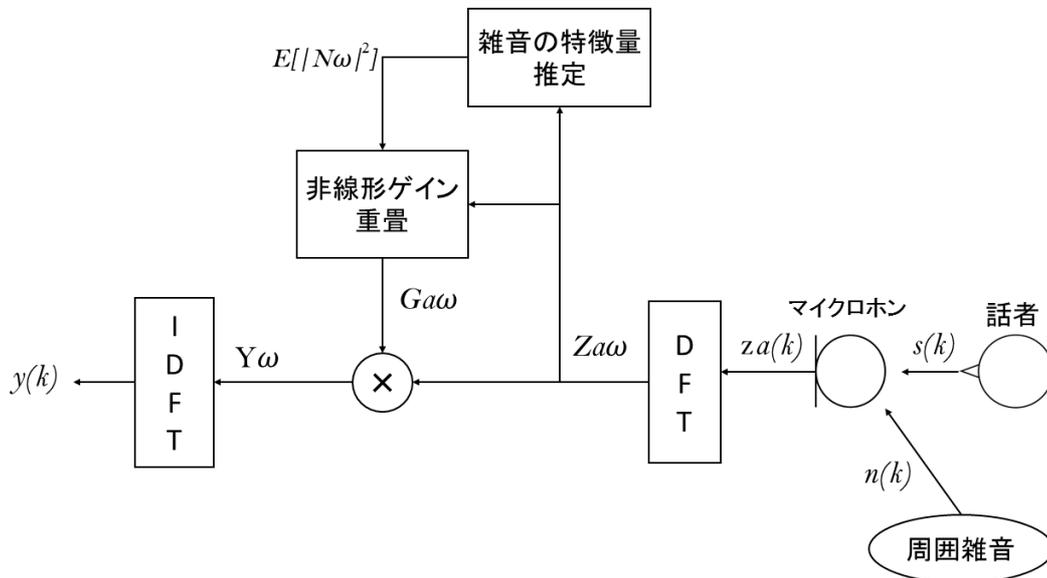


図 2.4 短時間スペクトル振幅推定法による雑音抑圧処理構成

2.2.3 問題点の解決策

単一マイクロホンを用いた雑音抑圧処理の問題点を挙げ，遠隔会議で用いられる音響エコーキャンセラに必要な雑音抑圧処理技術を検討した．単一マイクロホンを用いた短時間スペクトル振幅推定法による雑音抑圧処理は，雑音の特徴量を推定し，雑音混じり話者の音声の特徴量から雑音を抑圧する．この方法では雑音が周波数ごとに音量が時間変化しない，つまり定常であることを利用することにより，定常雑音の抑圧を効果的に行うことができる．これより，単一マイクロホンを用いた雑音抑圧処理では，雑音の定常性に依存しており，周波数ごとの音量が時間変化する非定常雑音の抑圧は困難であると考えられる．しかし，遠隔会議ではパソコンの操作音や資料をめくる音など，卓上で非定常雑音が発生すると想定される．よって，遠隔会議で生じる非定常雑音には，単一マイクロホンを用いた雑音抑圧処理は

2.2 遠隔会議で用いられる音響エコーキャンセラに必要な雑音抑圧処理

適していないという問題点が挙げられる。

本研究では，単一マイクロホンを用いた雑音抑圧処理では遠隔会議で生じる非定常雑音を抑圧できないという問題点から，遠隔会議で用いられる音響エコーキャンセラに必要な雑音抑圧処理技術を検討した．単一マイクロホンを用いた雑音抑圧処理では入力信号が限られるため，雑音の定常性に依存してしまう．よって，2つのマイクロホンを用いて，雑音源からマイクロホン間の音の空間的情報を利用し，雑音抑圧処理を行うことにより解決できると考えた．第3章では，問題点の解決策として，2つマイクロホンを用いた非定常雑音抑圧処理について説明する．

第3章

垂直に並べた2つのマイクロホンを用いた非定常雑音抑圧処理

単一マイクロホンを用いた雑音抑圧処理は、雑音が定常であることを利用して、音声と雑音の特徴量から雑音抑圧を行う。そのため、定常雑音の抑圧しか行うことができない。しかし、遠隔会議では卓上でパソコンの操作音や資料をめくる音などの非定常雑音が生じることが考えられる。よって、単一マイクロホンを用いた雑音抑圧処理では非定常雑音の抑圧は困難である。そこで、本研究では、遠隔会議で用いられる音響エコーキャンセラに必要な雑音抑圧処理技術として、2つのマイクロホンを用いた雑音抑圧処理を考えた。2つのマイクロホンを用いた雑音抑圧処理により、遠隔会議で生じる非定常雑音の抑圧を目指す。

本章では、本研究での位置付けにより、垂直に並べた2つのマイクロホンに音が到達する時間差を用いた非定常雑音抑圧処理の原理を説明する。また、到達時間差を求めるために用いた相互相関について説明する。さらに、推定した到達時間差を用いた信号の減算処理による雑音抑圧法を説明する。

3.1 本研究の位置付け

本研究での位置付けにより、垂直に並べた2つのマイクロホンに音が到達する時間差を用いた非定常雑音抑圧処理の原理を説明する。本研究で抑圧する雑音は会議の現場で生じるパソコンの操作音や資料をめくる音など、周波数が時間的に変化する非定常雑音を抑圧対象とし、非定常雑音は卓上で生じると条件を付ける。抑圧手法は、垂直に並べた2つのマイクロ

3.1 本研究の位置付け

ホンを用いて、音源から出力された音が2つのマイクロホンに到達する時間差により雑音抑圧を行う。垂直に並べた2つのマイクロホンを固定し、各マイクロホンに話者の声、卓上で生じる雑音が到達する時間差を図 3.1, 3.2 に示す。図 3.1, 3.2 のように、人の発話と卓上で生じる雑音の音源の位置が違うことにより、2つのマイクロホンに音が到達する時間差に違いが生じる。音の到達時間差の違いから、人の発話か雑音であるかを判別し、雑音だけを抑圧を可能とする。



図 3.1 話者の声が2つのマイクロホンに到達する時間差

3.2 雑音抑圧処理の構成



図 3.2 卓上で生じる雑音が2つのマイクロホンに到達する時間差

3.2 雑音抑圧処理の構成

雑音抑圧処理の構成を説明する。雑音抑圧処理の構成を図 3.3 に示す。ある雑音源から出力された雑音が、垂直に並べた2つのマイクロホンに雑音信号が收音される。收音された際に生じる到達時間差を推定する。推定した到達時間差により発生する各信号の遅延を除去し、各雑音信号を同相化することにより位相をそろえる。そして、各雑音信号を減算することにより雑音抑圧を行う。

3.3 相互相関法による到達時間差推定



図 3.3 雑音抑圧処理の構成

3.3 相互相関法による到達時間差推定

到達時間差を推定するために求めた相互相関について説明する。人の発話と卓上で生じる雑音の発生位置の違いから、人の発話か雑音であるかの判別には、2つのマイクロホンに音が到達する時間差の違いから判断する。非定常雑音抑圧処理のためには2つのマイクロホンに音が到達する時間差を求める必要がある。ある音源から出力された音が2つのマイクロホン M_1, M_2 で收音される信号を図 3.4 に示す。図 3.4 より、音源からの2つのマイクロホンまでの距離の差によって音の到達時間差が発生し、この音の到達時間差によって2つのマイクロホンで收音される信号に位相差が発生する。2つのマイクロホンで收音された各信号は、1つの音源から来た信号であり、時間軸のずれを除けば類似した信号であるため、 M_1 で收音された信号をどのくらいずらせば M_2 で收音されたと類似しているかを示す尺度が必要となる。相互相関法により類似した尺度つまり相関値を求め、その相関値を用いて各信号の位相差を求める。類似した2つの信号を x_1, x_2 とすると、相関値 $R_{x_1 x_2}[T]$ は、

$$R_{x_1 x_2}[T] = \sum_{n=0}^{N-1} x_1[n-T]x_2[n] \quad (3.1)$$

3.3 相互相関法による到達時間差推定

で表される [5]. N は信号長, 相関値 $R_{x_1x_2}[T]$ は, 信号 $x_1[n]$ を T サンプル分ずらした信号 $x_1[n - T]$ と信号 $x_2[n]$ の類似性を表しており, 相関値が 1 に近いほど類似性が高く, 0 に近いほど類似性が低いことを示す. 従って, $R_{x_1x_2}[T]$ が最大するとき T サンプル分ずれた信号 x_1 と信号 x_2 は最も類似していることになる. つまり, 相関値が最大の際のずらしら T サンプル分が, 2 つの信号の時間軸のずれ, つまり到達時間差であるといえる. 相関値が最大の際のずらしたサンプル数を T_{max} , 録音した音のサンプリング周波数を F_s とすると, 2 つのマイクロホンに音が到達する時間差 τ は,

$$\tau = \frac{T_{max}}{F_s} \quad (3.2)$$

と表される. このように, 音源から出力された音が 2 つのマイクロホンに到達する時間差は, 相互相関法を用いて求めることができる.

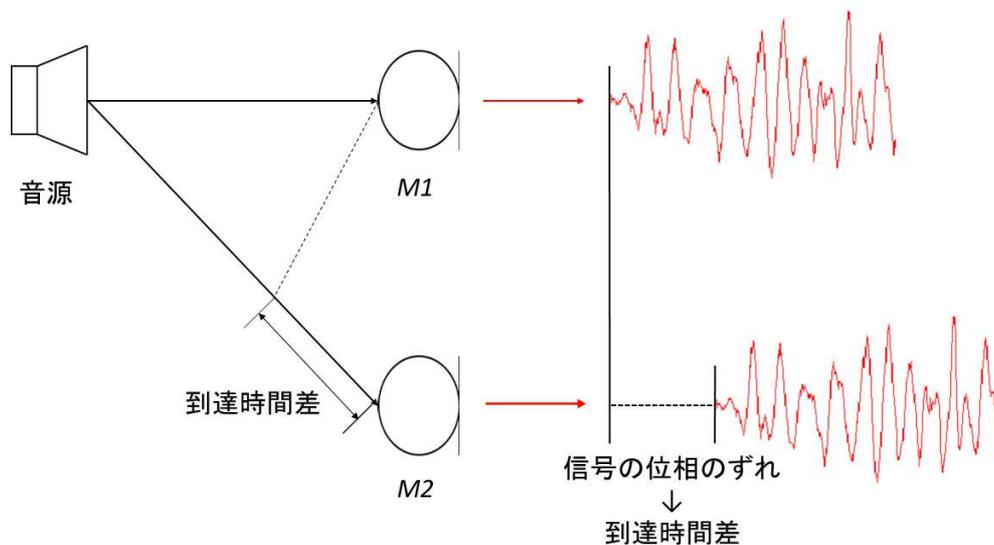


図 3.4 2 つのマイクロホンで収録される信号

3.4 減算処理による雑音抑圧処理

相互相関により求めた，2つのマイクロホンに雑音信号が到達する時間差を用いた，各雑音信号の減算処理による雑音抑圧方法を説明する．2つのマイクロホンに収録された雑音信号を x_1, x_2 とすると，類似した2つの雑音信号には，

$$x_2(t) = x_1(t - \tau) \quad (3.3)$$

の関係が成立する [6]． τ は相互相関により求めた，到達時間差である．2つのマイクロホンに収録された雑音信号 x_1, x_2 の相関値が最大となる時の時間軸のずれは図 3.5 のように表される．このとき， x_1 を到達時間差 τ だけ遅延させ，信号の位相を揃えることにより，2つの信号に含まれる雑音成分は同相化される．雑音抑圧後の信号 $s(t)$ は，

$$s(t) = x_2(t) - x_1(t - \tau) \quad (3.4)$$

と表すことができ，同相化した雑音信号を減算することにより雑音抑圧が可能となる．

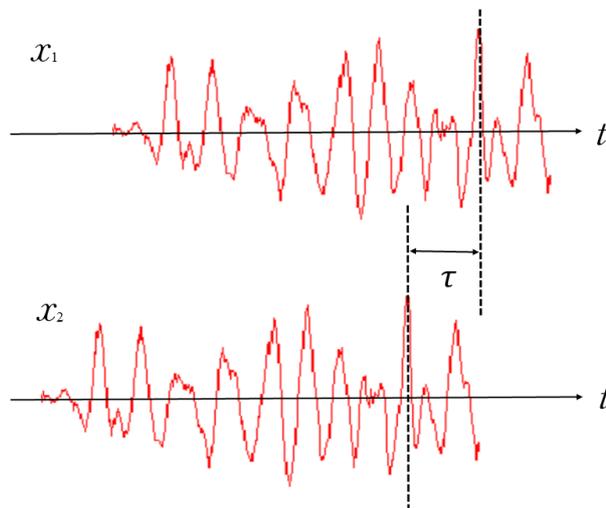


図 3.5 2つのマイクロホンで収録された雑音信号相関値が最大となる時の時間軸のずれ

第4章

垂直に並べた2つのマイクロホンを用いた雑音抑圧実験

本章では、遠隔会議において卓上で生じる非定常雑音を抑圧を行った。第3章で説明した雑音抑圧処理技術の有効性を確かめる実験を行った。実験は音源から出力された音が垂直に並べた2つマイクロホンに収録され、音が各マイクロホンに到達する時間差を推定し、到達時間差により生じる各信号の遅延をなくし位相をそろえる。位相をそろえた信号に減算処理を行い、雑音を抑圧した。

遠隔会議でマイクロホンに収録される音は雑音源からの直接音だけでなく、壁や机で跳ね返った反射音が収録されるが考えられる。そのため、反射音の影響をなくすために、吸音材を用いた実験と、反射音が雑音抑圧処理にどの程度影響を及ぼすかを検証するために、吸音材を用いない実験を行った。吸音材を用いた実験では非定常雑音の抑圧および定常雑音の抑圧実験を行った。また、人の発話後に非定常雑音が生じた音および人の発話と非定常雑音が同時に生じた音において、非定常雑音のみ抑圧を抑圧できるかの実験を行った。吸音材を用いない実験では、非定常雑音の抑圧および定常雑音の抑圧実験を行った。

実験結果を示し、実験結果から考えられる問題点を挙げる。また、問題点の解決策を検討する。

4.1 雑音抑圧実験

4.1 雑音抑圧実験

垂直に並べた2つのマイクロホンに到達する時間差を用いた雑音抑圧実験の方法について説明する。2つのマイクロホンを用いて卓上で生じる雑音を收音し、各マイクロホンに音が到達する時間差を相互相関より求める。到達時間差により生じる信号の遅延をなくし位相をそろえ、減算することにより非定常雑音の抑圧を行った。遠隔会議でマイクロホンに收音される音は雑音源からの直接音だけでなく、壁や机で跳ね返った反射音が收音されるが考えられる。そのため、反射音の影響をなくすために、吸音材を用いた実験と、反射音が雑音抑圧処理にどの程度影響を及ぼすかを検証するために、吸音材を用いない実験を行った。実験で雑音と話者の声を録音するために用いた機材を表4.1に示す。

表 4.1 録音に用いた機材

PC	ThinkPad T440p
アプリケーション	Audacity
マイクロホン	SHURE SM94
オーディオインタフェース	Roland UA-101

4.1.1 吸音材を用いた実験

吸音材を用いた実験環境を図4.1に示す。また、図4.1のように、マイクロホン間の距離および机からの高さ、雑音の発生位置、話者の発話位置を固定した。2つのマイクロホンに音が到達する時間差を用いた雑音抑圧処理では、反射音の影響により抑圧性能の劣化が考えられる。従って、反射音の影響をなくすため、吸音材で囲み実験を行った。実験では遠隔会議で想定される卓上で生じる非定常雑音として、キーボードの打鍵音と紙をめくる音を使用した。2つのマイクロホンに各非定常雑音が到達する時間差を用いて、非定常雑音のみでの雑音抑圧を行った。

また、人の発話か卓上で生じる非定常雑音であるかを判別して非定常雑音だけを抑圧する

4.1 雑音抑圧実験

ために、人の発話後に非定常雑音が生じた音を使用し、雑音のみの抑圧が可能であるかを検証した。

さらに、人の発話か卓上で生じる非定常雑音であるかを判別して非定常雑音だけを抑圧するために、人の発話と非定常雑音が同時に生じた音を使用し、雑音のみの抑圧が可能であるかを検証した。人の発話と非定常雑音の判別方法は、人の発話位置と非定常雑音の発生位置の違いにより、2つのマイクロホンに音が到達する時間差の違いにより判別を行った。到達時間差の違いを発生させるために、2つのマイクロホンに話者の声が到達する時間が一致するところにマイクロホンを固定し、卓上で生じる非定常雑音が2つのマイクロホンに到達する時間差を発生させた。

また、定常雑音の抑圧が可能であるのかも検証するために、ファンの動作音を使用した。実験で使用した各非定常雑音、定常雑音、話者の声のサンプリング周波数は 44.1kHz とする。

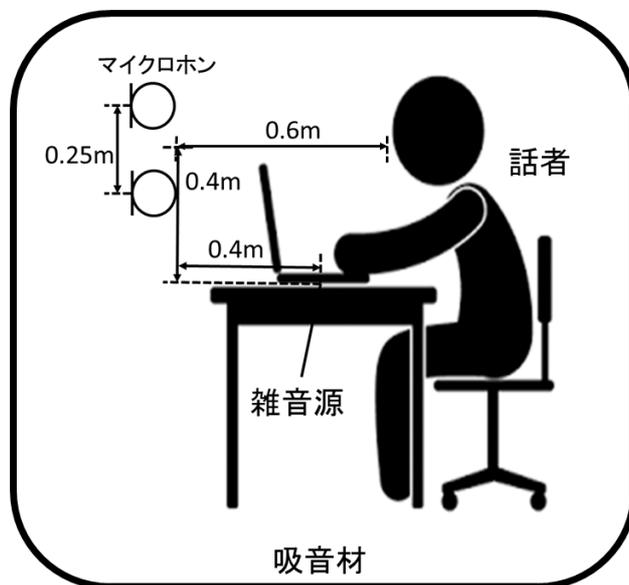


図 4.1 吸音材を用いた実験環境

4.2 実験結果

4.1.2 吸音材を用いない実験

吸音材を用いた実験環境を図 4.2 に示す。また、図 4.2 のように、マイクロホン間の距離および机からの高さ、雑音の発生位置、話者の発話位置を固定した。遠隔会議のような反射音が発生する環境で 2 つのマイクロホンに音が到達する時間差を用いた雑音抑圧処理の抑圧性能にどのくらいの影響を与えるかを検証するために、吸音材を用いずに実験を行った。吸音材を用いた実験と同様に、遠隔会議で想定される卓上で生じる非定常雑音として、キーボードの打鍵音と紙をめくる音を使用した。また、定常雑音の抑圧が可能であるのかも検証するために、ファンの動作音を使用した。実験で使用した各非定常雑音のサンプリング周波数は 44.1kHz とする。

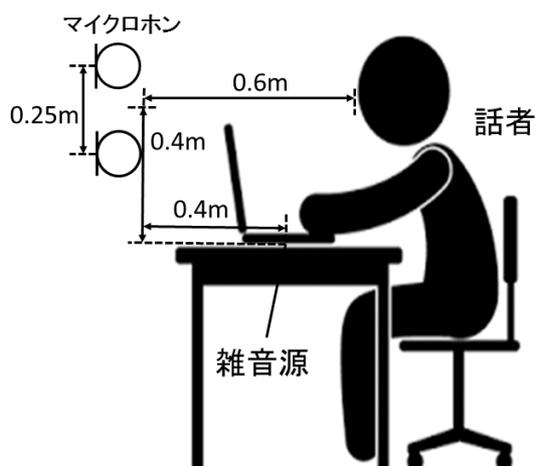


図 4.2 吸音材を用いない実験環境

4.2 実験結果

垂直に並べた 2 つのマイクロホンに到達する時間差を用いた雑音抑圧実験結果を示し、実験結果をまとめる。反射音をなくすために、吸音材を用いた実験と、反射音が雑音抑圧処理にどの程度影響を及ぼすかを検証するために、吸音材を用いない実験を行った結果を示す。

4.2 実験結果

4.2.1 吸音材を用いた実験

非定常雑音のみでの雑音抑圧処理結果を示す。2つのマイクロホンに非定常雑音が到達する時間差を推定し、到達時間差により生じる信号の遅延をなくし位相をそろえたキーボードの打鍵音の音声波形を図4.3に、紙をめくる音の音声波形を図4.5に示す。2つのマイクロホンで収録された非定常雑音信号のみの減算処理による雑音抑圧後のキーボードの打鍵音の音声波形を図4.4に、紙をめくる音の音声波形を図4.6に示す。図の横軸はサンプル数、縦軸は振幅を示す。雑音抑圧後の波形を確認すると、抑圧前と抑圧後の波形において振幅が減少していることが確認できた。また、雑音抑圧後の音声を確認すると、キーボードの打鍵音および紙をめくる音がほぼ聞こえなかったため、非定常雑音の抑圧ができたことが確認できた。

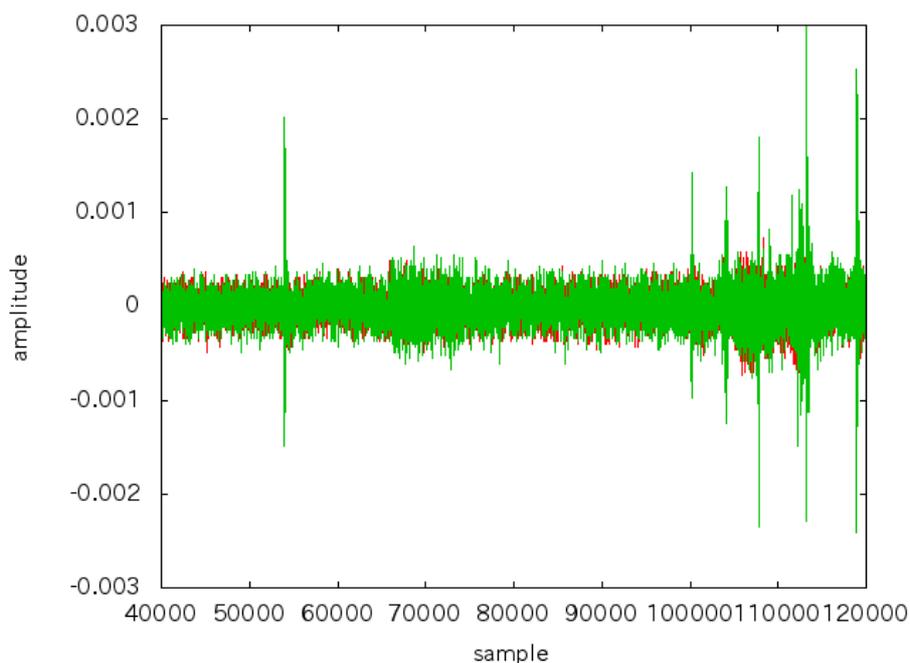


図 4.3 到達時間差の遅延をなくし位相をそろえたキーボードの打鍵音の音声波形

4.2 実験結果

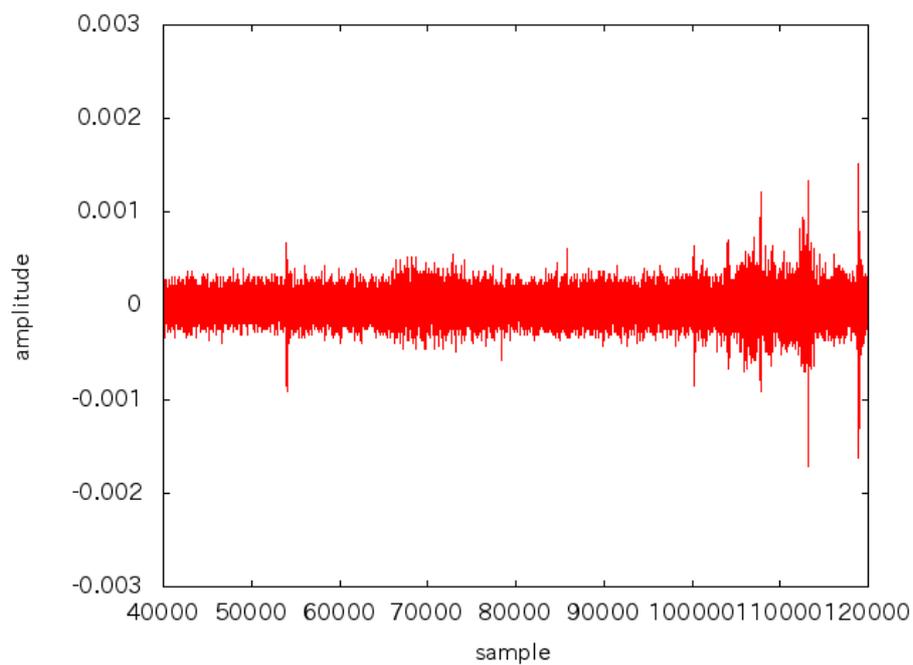


図 4.4 雑音抑圧処理後のキーボードの打鍵音の音声波形

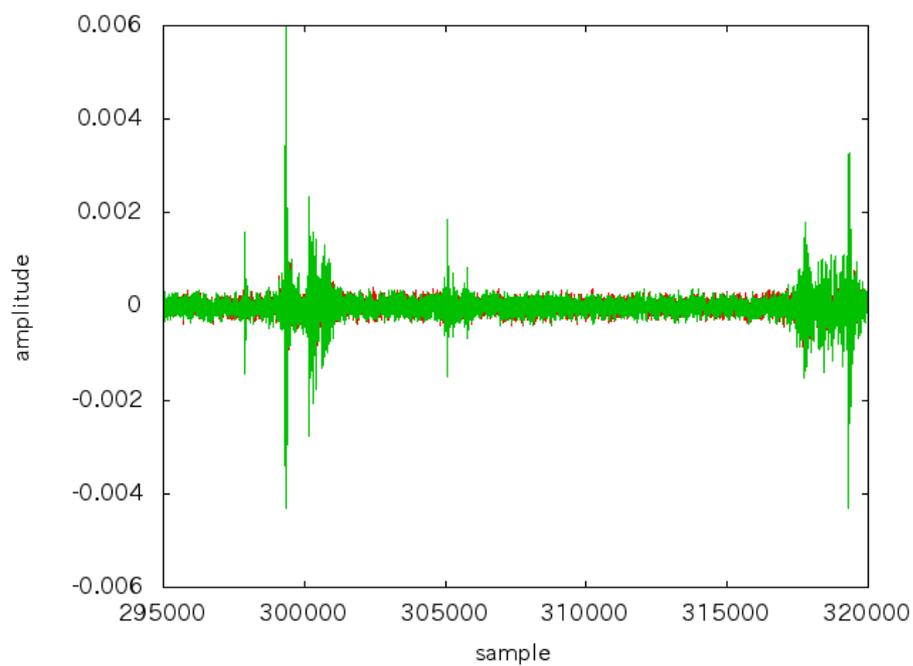


図 4.5 到達時間差の遅延をなくし位相をそろえた紙をめくる音の音声波形

4.2 実験結果

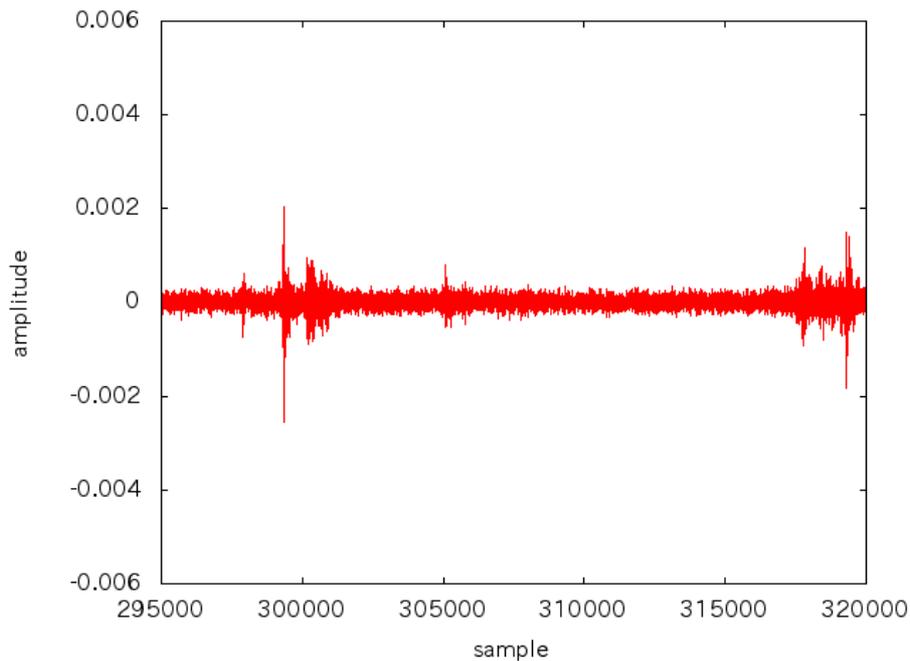


図 4.6 雑音抑圧処理後の紙をめくる音の音声波形

人の発話後に非定常雑音が生じた音での雑音抑圧処理結果を示す。2つのマイクロホンに非定常雑音が到達する時間差を推定し、到達時間差により生じる信号の遅延をなくし位相をそろえた、人の発話後にキーボードの打鍵音が生じた音声波形を図 4.7 に、人の発話後に紙をめくる音が生じた音声波形を図 4.9 に示す。2つのマイクロホンで収録された音声信号の減算処理による雑音抑圧後の、人の発話後にキーボードの打鍵音が生じた音声波形を図 4.8 に、人の発話後に紙をめくる音が生じた音声波形を図 4.10 に示す。図の横軸はサンプル数、縦軸は振幅を示す。雑音抑圧後の波形を確認すると、抑圧前と抑圧後の波形において、話者の音声波形では振幅にあまり変化がなく、非定常雑音の波形では振幅が減少していることが確認できた。また、雑音抑圧後の音声と確認すると、話者の音声はあまり変化がなく、キーボードの打鍵音および紙をめくる音はほぼ聞こえなかったため、人の発話後に非定常雑音が生じた音より雑音のみの抑圧ができたことが確認できた。しかし、雑音抑圧処理後の話者の音声にひずみが発生していることが確認できた。

4.2 実験結果

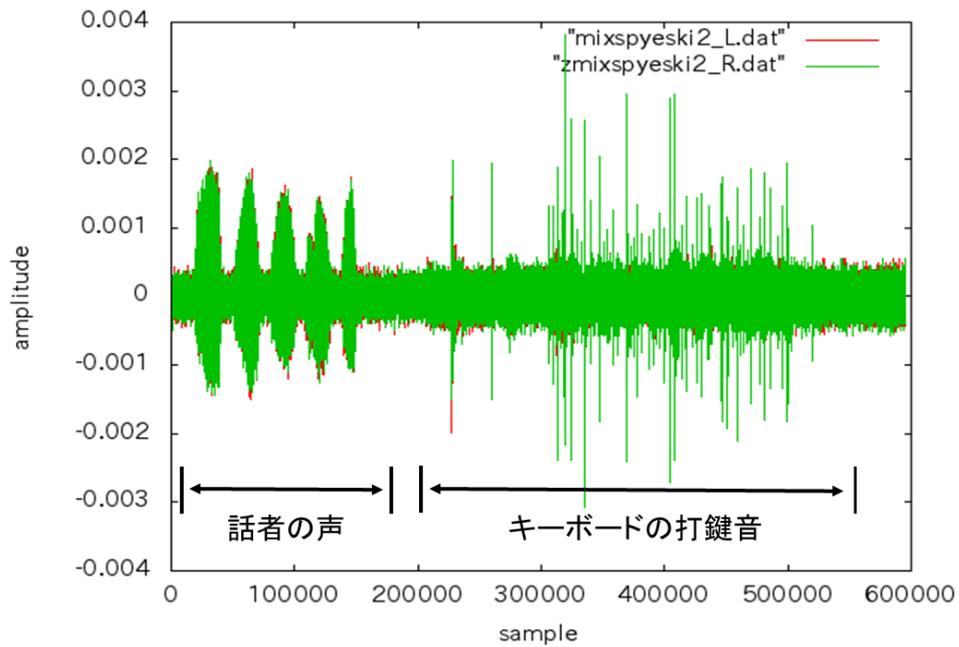


図 4.7 到達時間差の遅延をなくし位相をそろえた人の発話後にキーボードの打鍵音が生じた音声波形

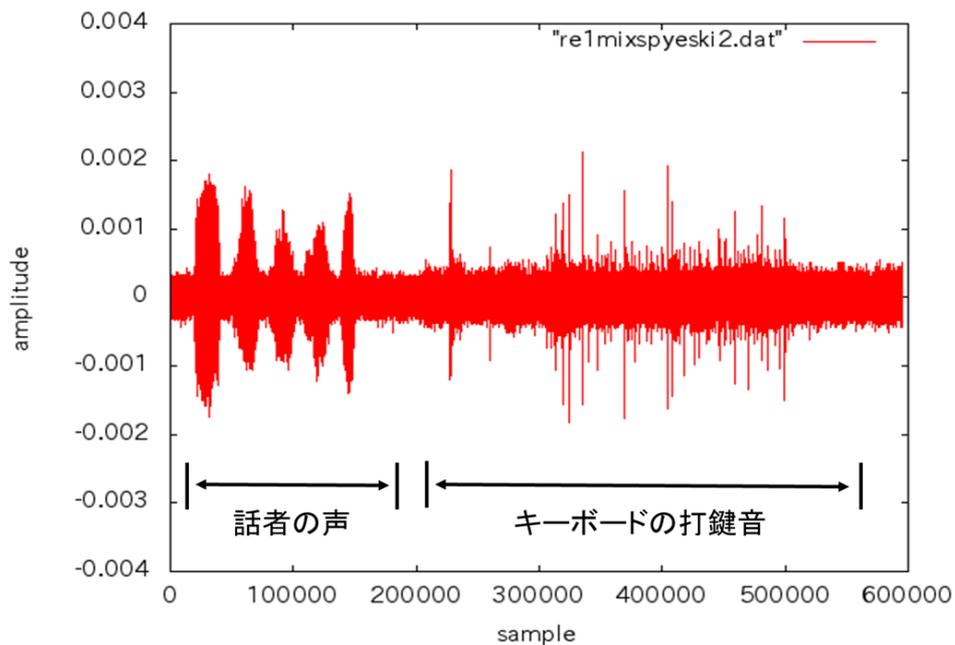


図 4.8 雑音抑圧処理後の人の発話後にキーボードの打鍵音が生じた音声波形

4.2 実験結果

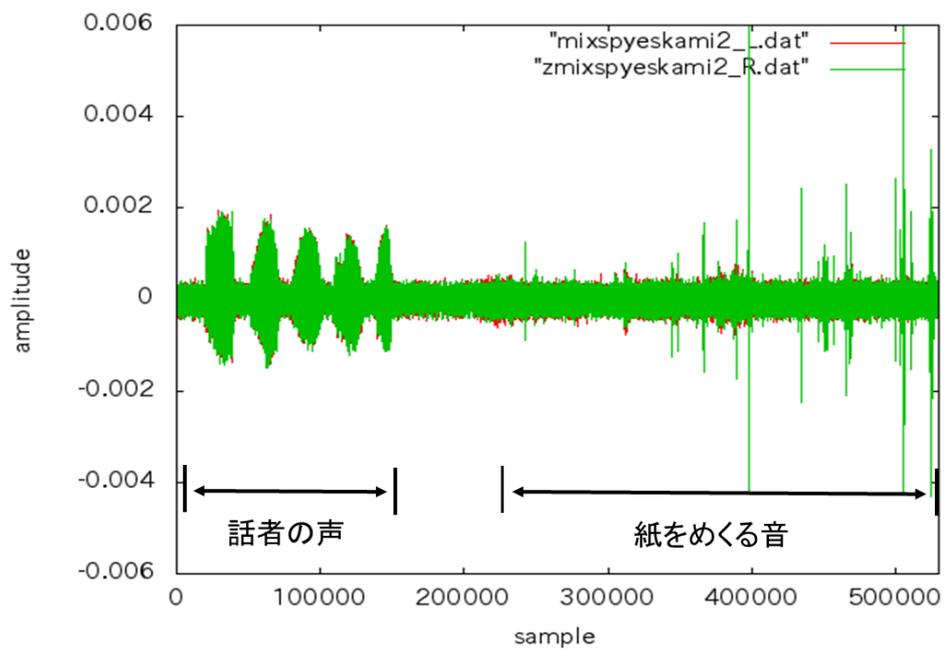


図 4.9 到達時間差の遅延をなくし位相をそろえた人の発話後に紙をめくる音が生じた音声波形

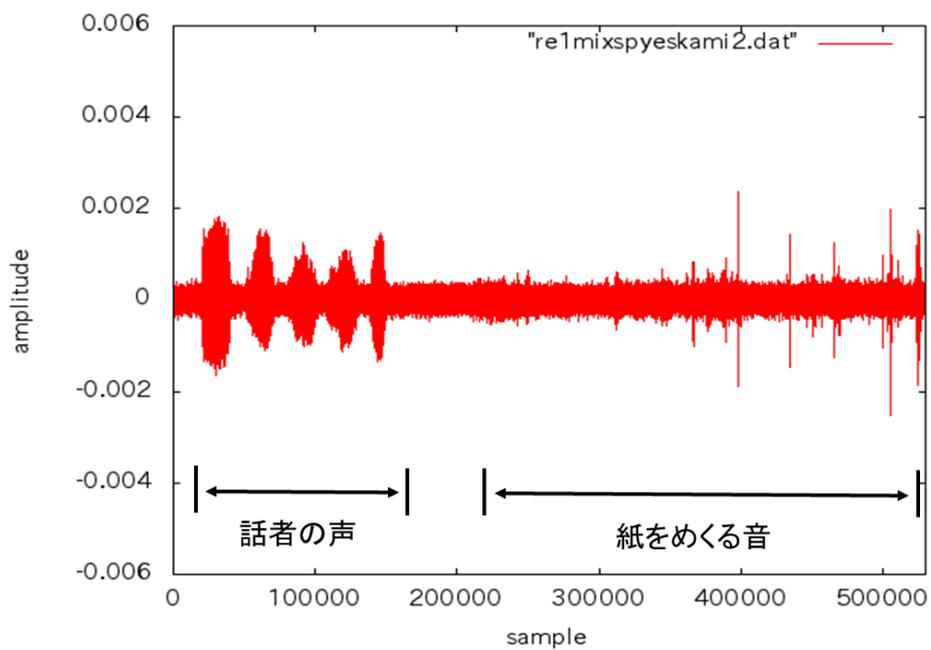


図 4.10 雑音抑圧処理後の人の発話後に紙をめくる音が生じた音声波形

4.2 実験結果

人の発話と非定常雑音が同時に生じた音での雑音抑圧処理結果を示す。2つのマイクロホンに非定常雑音が到達する時間差を推定し、到達時間差により生じる信号の遅延をなくし位相をそろえた、人の発話とキーボードの打鍵音が同時に生じた音声波形を図 4.11 に、人の発話と紙をめくる音が同時に生じた音声波形を図 4.13 に示す。2つのマイクロホンで収録された音声信号の減算処理による雑音抑圧後の、人の発話とキーボードの打鍵音が同時に生じた音声波形を図 4.12 に、人の発話と紙をめくる音が同時に生じた音声波形を図 4.14 に示す。図の横軸はサンプル数、縦軸は振幅を示す。雑音抑圧後の波形を確認すると、抑圧前と抑圧後の波形において、話者の音声波形では振幅にあまり変化がなく、非定常雑音の波形では振幅が減少していることが確認できた。また、音声を確認すると、話者の音声にはあまり変化がなく、キーボードの打鍵音および紙をめくる音はほぼ聞こえなかったため、人の発話と非定常雑音が同時に生じた音より雑音のみの抑圧ができたことが確認できた。しかし、雑音抑圧処理後の話者の音声にひずみが発生していることが確認できた。

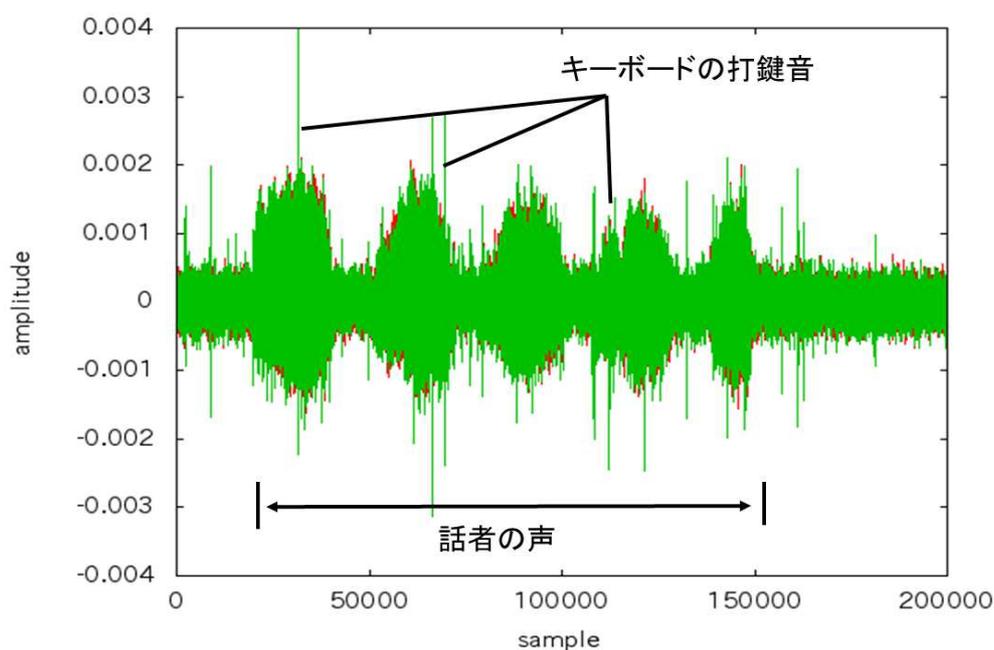


図 4.11 到達時間差の遅延をなくし位相をそろえた人の発話後にキーボードの打鍵音が生じた音声波形

4.2 実験結果

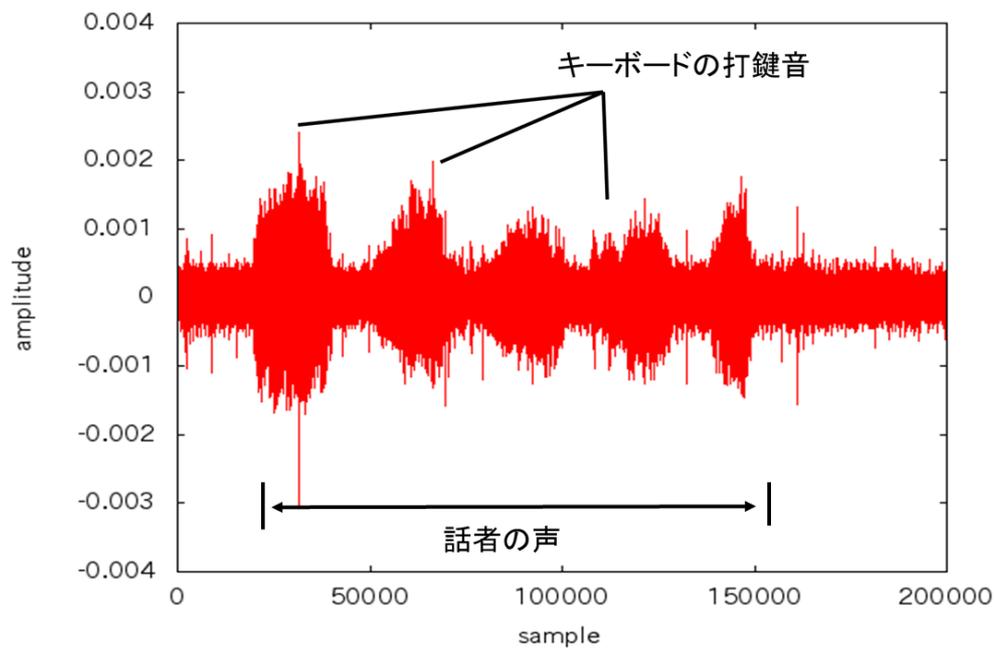


図 4.12 雑音抑圧処理後の人の発話後にキーボードの打鍵音が生じた音声波形

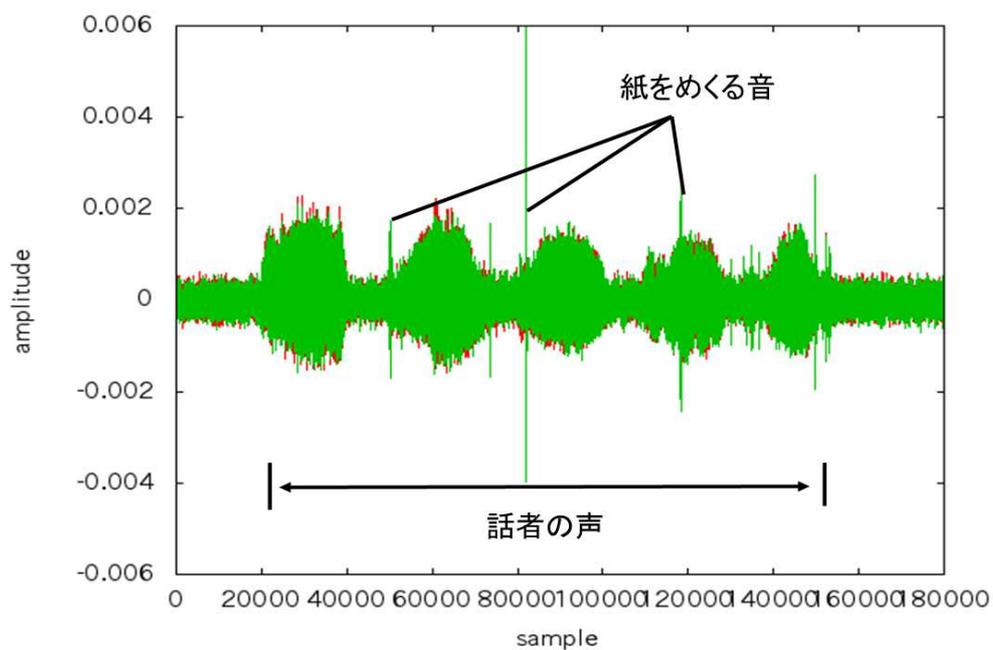


図 4.13 到達時間差の遅延をなくし位相をそろえた人の発話後に紙をめくる音が生じた音声波形

4.2 実験結果

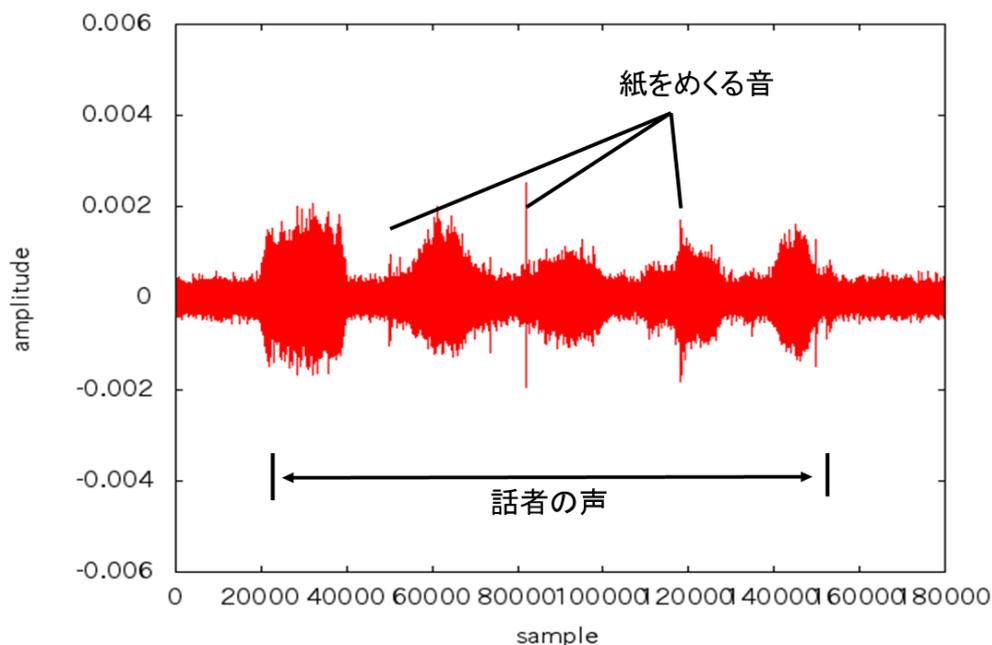


図 4.14 雑音抑圧処理後の人の発話後に紙をめくる音が生じた音声波形

定常雑音の雑音抑圧処理結果を示す。2つのマイクロホンに定常雑音が到達する時間差を推定し、到達時間差により生じる信号の遅延をなくし位相をそろえた、ファンの動作音の音声波形を図 4.15 に示す。2つのマイクロホンで収録された定常雑音信号の減算処理による雑音抑圧処理後のファンの動作音の音声波形を図 4.16 に示す。図の横軸はサンプル数、縦軸は振幅を示す。雑音抑圧処理後の波形を確認すると、抑圧前と抑圧後の波形において、振幅が少し減少しているが、大きな変化がないことが確認できた。しかし、雑音抑圧後の音声を確認すると、ファンの動作音がほぼ聞こえなかったため、定常雑音の抑圧ができたことが確認できた。

4.2 実験結果

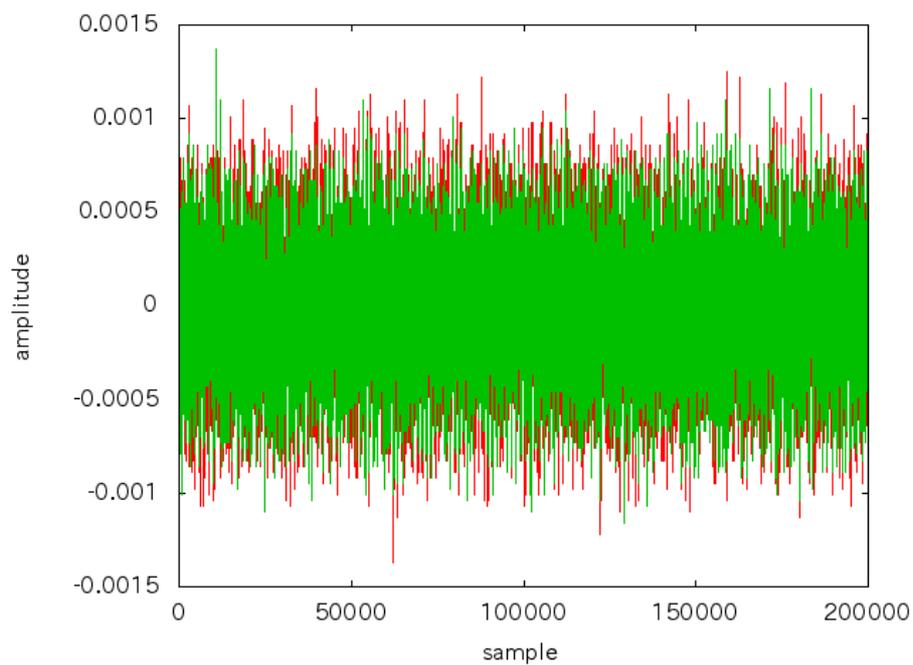


図 4.15 到達時間差の遅延をなくし位相をそろえたファンの動作音の音声波形

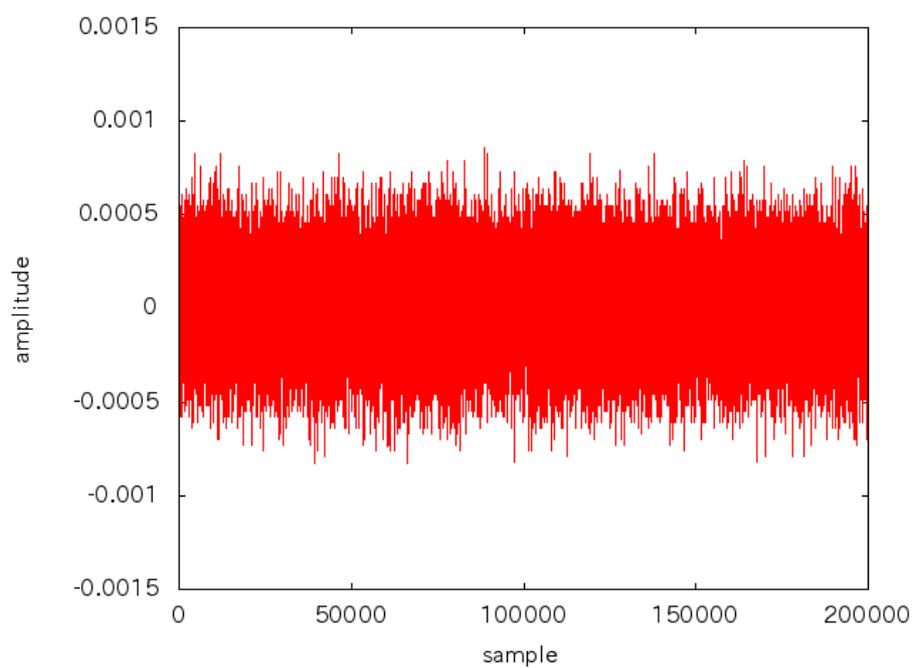


図 4.16 雑音抑圧処理後のファンの動作音の音声波形

4.2 実験結果

4.2.2 吸音材を用いない実験

非定常雑音のみでの雑音抑圧処理結果を示す。2つのマイクロホンに非定常雑音が到達する時間差を推定し、到達時間差により生じる信号の遅延をなくし位相をそろえたキーボードの打鍵音の音声波形を図 4.17 に、紙をめくる音の音声波形を図 4.19 に示す。2つのマイクロホンで収録された非定常雑音信号のみの減算処理による雑音抑圧後のキーボードの打鍵音の音声波形を図 4.18 に、紙をめくる音の音声波形を図 4.20 に示す。図の横軸はサンプル数、縦軸は振幅を示す。到達時間差により生じる遅延をなくし2つの信号の位相をそろえた結果より、2つの波形の類似度が低いといえる。雑音抑圧後の波形を確認すると、抑圧前と抑圧後の波形において振幅が減少おらず、雑音抑圧処理の効果がないことがわかった。また、雑音抑圧後の音声を確認すると、キーボードの打鍵音および紙は抑圧されていなかった。

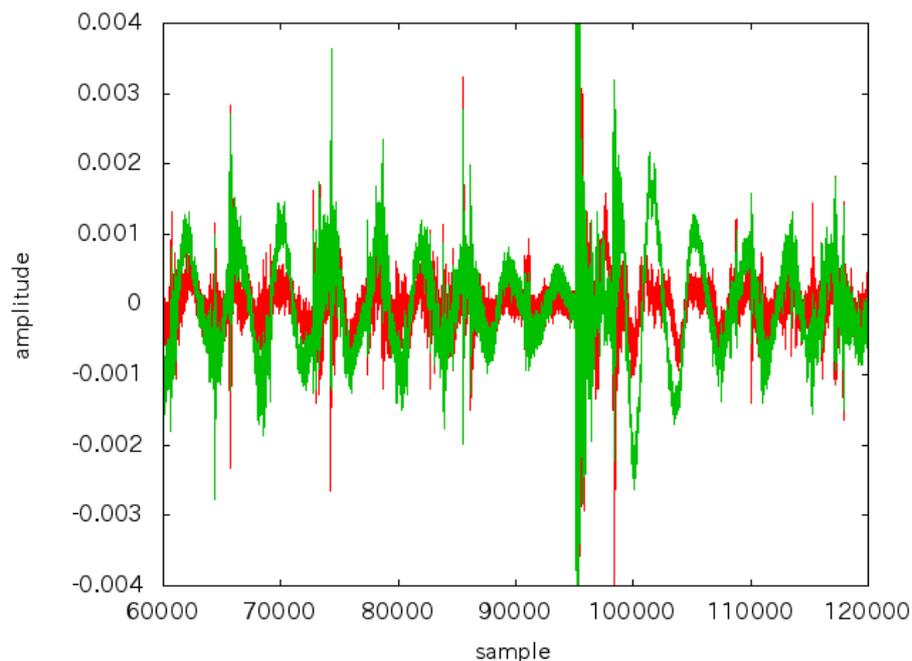


図 4.17 2つのマイクロホンで収録された各信号の位相をそろえたキーボードの打鍵音の音声波形

4.2 実験結果

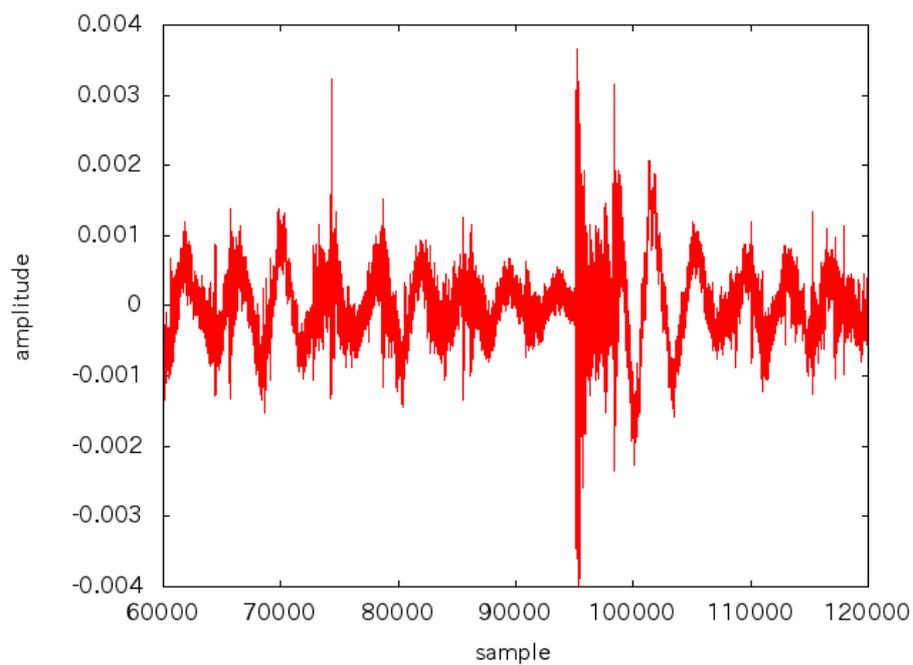


図 4.18 雑音抑圧処理後のキーボードの打鍵音の音声波形

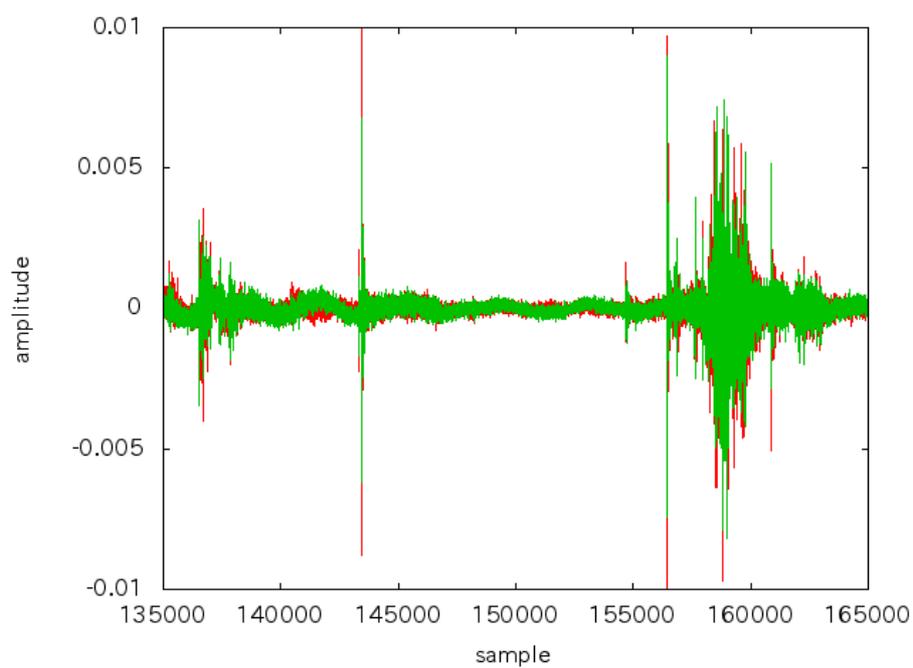


図 4.19 2つのマイクロホンで収録された各信号の位相をそろえた紙をめくる音の音声波形

4.2 実験結果

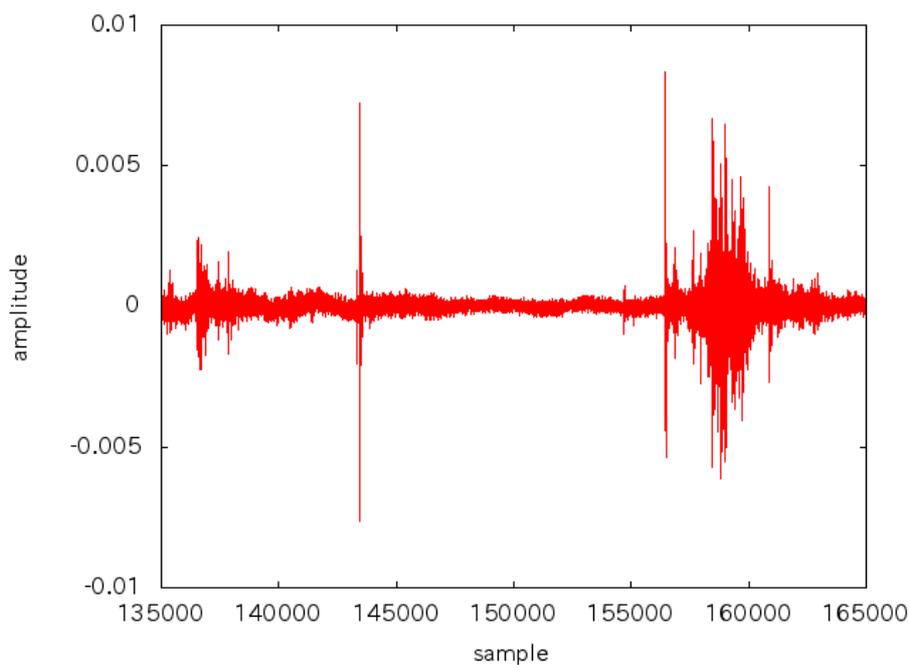


図 4.20 雑音抑圧処理後の紙をめくる音の音声波形

定常雑音の雑音抑圧処理結果を示す。2つのマイクロホンに定常雑音が到達する時間差を推定し、到達時間差により生じる信号の遅延をなくし位相をそろえた、ファンの動作音の音声波形を図 4.21 に示す。2つのマイクロホンで収録された定常雑音信号の減算処理による雑音抑圧処理後のファンの動作音の音声波形を図 4.22 に示す。図の横軸はサンプル数、縦軸は振幅を示す。雑音抑圧処理後の波形を確認すると、抑圧前と抑圧後の波形において、振幅が少し減少しているが、大きな変化がないことが確認できた。しかし、雑音抑圧後の音声を確認すると、ファンの動作音がほぼ聞こえなかったため、定常雑音の抑圧ができたことが確認できた。

4.2 実験結果

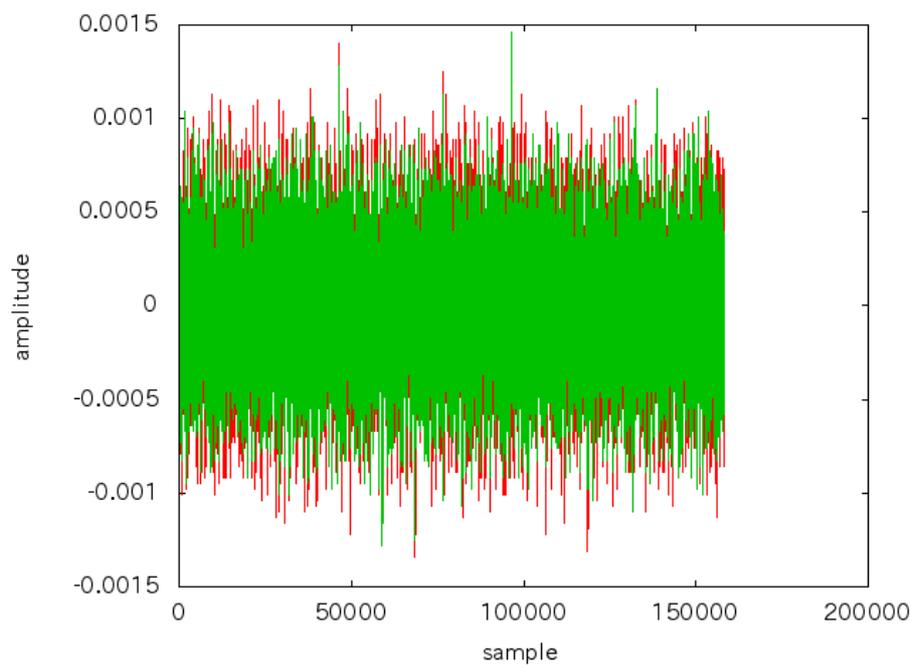


図 4.21 到達時間差の遅延をなくし位相をそろえたファンの動作音の音声波形

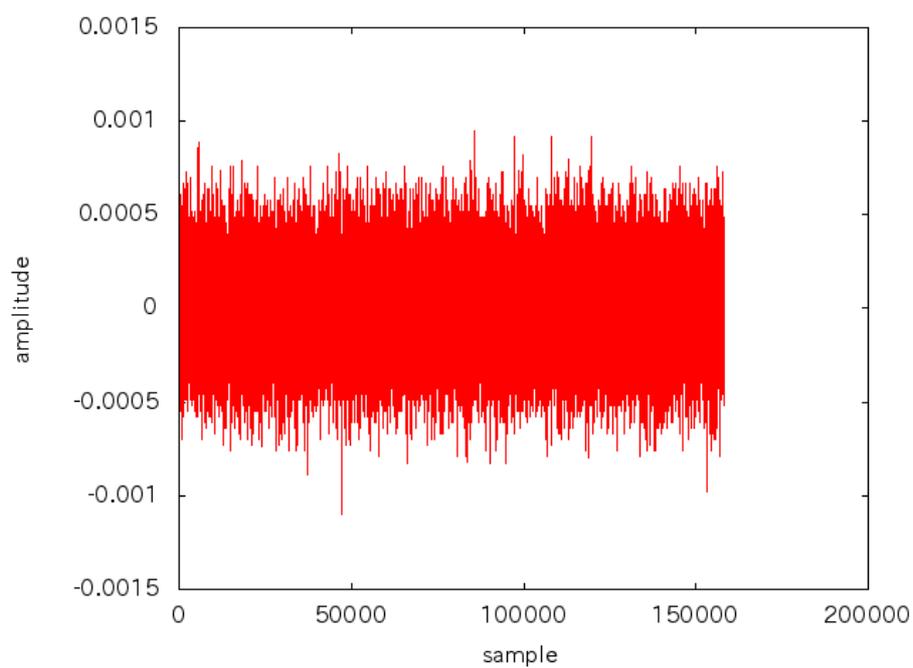


図 4.22 雑音抑圧処理後のファンの動作音の音声波形

4.3 考察

吸音材を用いた実験では、2つのマイクロホンに音が到達する時間差を用いて、非定常雑音および定常雑音の抑圧ができた。また、人の発話後に非定常雑音が生じた場合と人の発話が同時に生じた場合でも雑音のみの抑圧ができた。しかし、吸音材を用いない実験では、定常雑音の抑圧はできたが、非定常雑音の抑圧では効果がみられなかった。それは、2つのマイクロホンで収録した信号の到達時間差による遅延をなくし位相をそろえても、反射音の影響により、2つの信号の類似度が低くなったため、雑音抑圧の効果がみられなかったと考えることができる。定常雑音は、周波数ごとの音量が時間変化しないことから、反射音の影響に左右されにくいため、定常雑音の抑圧ができたと考えられる。実験結果より、反射音の影響がある場合では非定常雑音抑圧の効果がみられなかったが、反射音の影響がない場合では効果的に雑音抑圧を行うことができた。そこで、反射音の影響のうけない雑音抑圧処理を用いることで、遠隔会議で想定される卓上で生じる非定常雑音を効果的に抑圧できると考えられる。

第5章

結論

5.1 本論文のまとめ

本研究では、遠隔会議で用いられる音響エコーキャンセラに必要な雑音抑圧処理技術として、垂直に並べた2つのマイクロホンを用いて雑音抑圧処理を行った。遠隔会議において卓上で生じる非定常雑音を抑圧するために、2つのマイクロホンに雑音が到達する時間差を推定し、到達時間差により生じる信号の遅延をなくし、各信号の減算処理により雑音抑圧を行った。相互相関を用いて、垂直に並べた2つのマイクロホンに音が到達する時間差を推定した。到達時間差を用いた雑音抑圧実験結果より、反射音が発生しない場合は、非定常雑音および定常雑音の抑圧を効果的に行うことができた。また、人の発話後に雑音が生じた場合や、人の発話と雑音が同時に生じた場合においても、雑音のみ抑圧できていたことから、話者と雑音の音源位置の違いより、人の発話と雑音の判別ができたことが確認できた。しかし、反射音が発生した場合の雑音抑圧性能を検証すると、反射音の影響により2つのマイクロホンで収録された雑音信号の類似度が低くなり、定常雑音の抑圧はできたが、非定常雑音の抑圧では効果がみられなかった。遠隔会議でマイクロホンに収録される音は雑音源からの直接音だけでなく、壁や机などで跳ね返った反射音が収録されるが考えられる。よって、遠隔会議で用いられる音響エコーキャンセラには本研究での雑音抑圧処理技術は適していないといえる。これらの問題点の解決策として適応フィルタを用いた反射音の影響をうけない雑音抑圧処理技術を用いることで、遠隔会議で反射音が発生した場合でも効果的に雑音抑圧することができるかと考察した。

5.2 今後の課題

遠隔会議でマイクロホンに収録される音は雑音源からの直接音だけでなく、壁や机などで跳ね返った反射音が収録されるが考えられる。そのため、遠隔会議で用いられる音響エコーキャンセラには本研究での雑音処理技術は適していないといえる。よって、反射音の影響を受けない雑音抑圧処理技術が必要であり、適応フィルタを用いて反射音の影響をなくし、効果的に雑音抑圧が行えることができると考察した。しかし、今回は適応フィルタを用いた雑音抑圧処理の実験を行っていない。そのため、反射音が発生する環境においても、卓上で生じる雑音の抑圧を効果的に行えるかを確かめる必要がある。

謝辞

本研究を行うにあたって、ご指摘頂いたことを活かさないような出来の悪い私に対し、最後まで見捨てることなくご指導して頂いた福本昌弘教授に心より感謝し、お礼申し上げます。研究室に配属されてから約2年間、大変お世話になりました。研究のことで多くの助言をくださったのにも関わらず、それを活かせなかったことに後悔しており、大変申し訳ないと思っております。また、週次報告をあまり提出しなかったことや梗概の提出締切りを守れなかったことについても申し訳ないと思っております。卒業研究発表用のスライド作成の際には、日々多忙の中、徹夜をさせてしまい、非常にご迷惑をお掛けしました。また、人一倍出来が悪く不真面目な私に、何度も助言やお叱りを頂き、感謝致します。何度も研究を諦めてしまいそうになりましたが、最後までやり遂げられたのも見捨てずに面倒を見てくださった先生のおかげです。

本研究の副査をして頂いた浜村昌則教授、吉田真一准教授にも深く感謝致します。また、梗概の提出が遅くなってしまったことをお詫び申し上げます。

卒業研究についてご相談にのって頂いた福富英次氏にも深く感謝致します。また、何度もお食事に連れて行ってくださり、有り難うございます。

何度も研究のことで質問に答えてくださった横田優佳氏にも深く感謝致します。

同研究室の同期である、宮西寛奈氏、田中麻実氏、佐藤諒氏、金元祐樹氏、鈴木翔太氏、永井匠氏、宮下慎司氏には大変お世話になりました。皆様と共に過ごせた日々はとても充実していました。また、イベントごとを任せっぱなしにしたことを大変申し訳なく思っております。

最後に、4年間の大学生活を支えてくださった家族をはじめとする、関わりあった皆様に深く感謝致します。

参考文献

- [1] 阪内澄宇, 羽田陽一, 田中雅史, 佐々木潤子, 片岡章俊, 雑音抑圧及びエコー抑圧機能を備えた音響エコーキャンセラ, 電子情報通信学会論文誌, Vol. J87-A, No. 4, pp. 448-457, Apr. 2004.
- [2] 大賀寿郎, 山崎芳男, 金子豊, 音響システムとデジタル信号処理, 電子情報通信学会, 1995
- [3] 大谷昌幸, 梶川嘉延, 野村康雄, サブ適応フィルタを用いた音響エコーキャンセラの提案, 信学技報, vol. EA2004-125, Jan. 2005.
- [4] 金学胤, 浅野太, 鈴木陽一, 曾根敏夫, 短時間振幅スペクトル推定を用いた2チャンネル音声強調法について, 信学技報, vol. EA95-19, Jun. 1995.
- [5] 眞溪歩, デジタル信号処理工学, 昭晃堂, 2004
- [6] 鹿野清宏, 中村哲, 伊勢史郎, 音声・音情報のデジタル信号処理, 昭晃堂, 1997