

長岡技術科学大学大学院
工学研究科修士論文

題 目

未推定経路に適用可能な
バーチャルマイクに関する研究

指導教員 準教授 杉田 泰則

著者 電気電子情報工学専攻
15314383 坂井 優斗

提出期日 平成31年2月8日

目 次

| | |
|----------------------------------|-----------|
| 第 1 章 はじめに | 1 |
| 1.1 研究背景 | 1 |
| 1.2 研究目的 | 2 |
| 1.3 本論文の構成 | 2 |
| 第 2 章 バーチャルマイク法 | 3 |
| 2.1 原理 | 3 |
| 2.2 問題点 | 4 |
| 第 3 章 提案法 | 6 |
| 3.1 システム概要 | 6 |
| 3.2 マイク間特性の同定 | 8 |
| 3.3 マイク間実効距離の推定 | 9 |
| 3.4 距離-振幅特性の推定 | 10 |
| 3.5 距離-群遅延特性の推定 | 11 |
| 3.6 所望位置振幅・位相特性の推定 | 13 |
| 3.7 所望空間特性推定・到来音予測 | 16 |
| 第 4 章 実験 | 17 |
| 4.1 実験条件 | 17 |
| 4.2 比較対象 | 18 |
| 4.3 実験結果 | 19 |
| 4.3.1 推定精度比較 | 19 |
| 4.3.1.1 帯域制限なし | 20 |
| 4.3.1.2 帯域制限あり | 24 |
| 4.3.2 所望位置変更に対する推定精度変化 | 27 |

| | |
|------------|----|
| 第 5 章 おわりに | 29 |
| 5.1 まとめ | 29 |
| 5.2 今後の課題 | 30 |
| 謝辞 | 31 |
| 参考文献 | 33 |
| 発表文献 | 34 |

第1章 はじめに

本章では、本論文の研究背景および目的、本論文の構成について述べる。

1.1 研究背景

近年、信号処理技術の技術発展及びプロセッサの性能向上により、これまで予め用意されていた信号に対して行っていた処理を、リアルタイムで行うことが可能になった。また、処理のリアルタイム性に注目し、能動的騒音制御など新たな応用分野が開拓され、音響信号処理技術が生活の中に広く普及した。

リアルタイム信号処理は処理遅延に着目すると大きく2つに区分できる。1つは、与えられた信号に対する処理について処理遅延が許容される処理である。主に音楽再生ソフトなどのイコライザや音質改善技術がこれにあたり、リアルタイムで処理を行うことで任意のタイミングで所望する特性の実現や切り替えが可能となっている。

もう1つは、入力に対して即座に応答・出力する必要がある処理である。携帯音楽プレイヤーに搭載されているノイズキャンセリング機能(能動的騒音制御)に代表される、取得した信号に対して瞬時に処理を行う必要がある技術であり、先に述べた技術発展などの理由から近年急速に普及している。しかし、この処理には信号取得のためにマイクを用いるため、マイクを設置できないような場面での応用が困難であるという問題を有している。

そこで現在、バーチャルマイク法[1]-[9]という手法の研究が進められている。これは、離れた位置に設置した参照マイクから所望位置の信号(到来音)を推定する手法である。マイクの設置自由度が高く、特に能動的騒音制御の分野において、大型医療装置(CT,MRI等)の動作騒音抑制[3]やアクティブ遮音壁[4]、ヘッドレスト内蔵型ノイズキャンセリング[6]-[8]など様々な応用が期待されている。

しかし、既存のバーチャルマイク法は参照用マイクと所望位置間の空間特性を事前に測定する必要がある。そのため、事前に測定した空間特性はシステム動作時に固定の特性となり、所望位置の変更や気温等の変化により、事前測定時とシステム動作時の空間特性が異なってしまう場面に適用できないという欠点を抱えている。

1.2 研究目的

従来のバーチャルマイク法におけるシステム動作前の事前測定を必要とせず、空間特性の変化に対応可能なバーチャルマイク法の実現を目的とする。本論文では、所望位置周辺に複数のマイクを設置し、環境音より推定した各マイク間空間特性と参照マイクから所望位置までの距離情報より所望位置までの空間特性を推定、到來音の予測を行う手法を提案する。空間特性の推定を環境音を用いてシステム動作と並行して行えるため、温度変化による空間特性変化に適応可能である。同時に所望位置までの距離情報を用いているため、システム動作中に所望位置を変更した場合の空間特性変化にも対応可能である。また、本論文では実験により提案法と従来法の比較を行い、提案法の有用性についても検証する。

1.3 本論文の構成

本論文の構成は以下のとおりである。第2章では、従来のバーチャルマイク法の原理及び問題点について述べる。第3章では、提案法である事前測定不要なバーチャルマイク法の原理について述べる。第4章では、実験による提案法と従来法の比較結果を示す。最後に、第5章では本論文の結論を述べる。

第 2 章 バーチャルマイク法

2.1 原理

従来のバーチャルマイク法の動作原理は、空間特性の事前測定と到来音予測の 2 つのステップに分けられる。

図 2.1 に空間特性の事前測定に用いられる適応フィルタを示す。この事前測定ステップでは、到来音を予測したい所望位置に観測マイクを設置し、参照マイクと観測マイク間の空間特性 G_v を適用フィルタを用いることで測定する。なお、ここでは有限インパルス応答 (FIR:Finite Impulse Response) フィルタを用いて空間特性を再現し、適応アルゴリズムには最小平均二乗 (LMS:Least Mean Square) 適応アルゴリズムを用いたシステムを例に説明する。

参照マイクと観測マイク間の空間特性 G_v を再現するフィルタ \hat{G}_v は次式 (2.1) でモデル化される。

$$\hat{G}_v(\omega) = \sum_{i=0}^{N-1} h_i e^{-j i \omega} \quad (2.1)$$

ここで、 h_i は参照マイクと観測マイク間のインパルス応答、 N はフィルタタップ数である。この h_i を次式 (2.2) に示す LMS 適応アルゴリズム [12] を用いて測定する。

$$\mathbf{h}(n+1) = \mathbf{h}(n) + \mu e(n) \mathbf{r}(n) \quad (2.2)$$

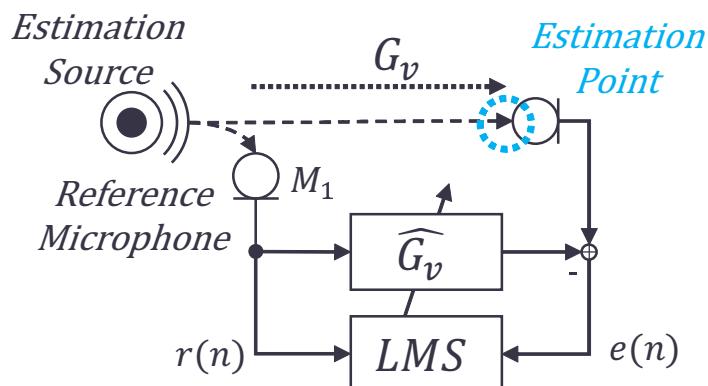


図 2.1 空間特性の事前測定

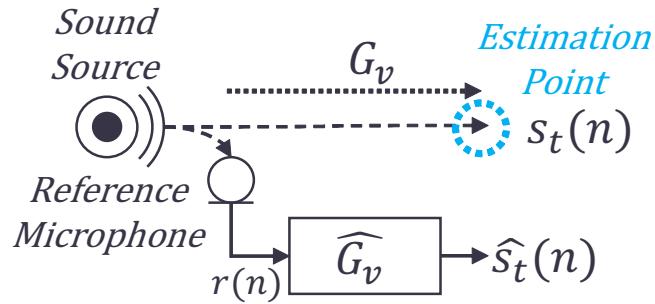


図 2.2 バーチャルマイク法による到来音の推定

ここで、 $\mathbf{h}(n) = [h_0(n), h_1(n), \dots, h_{N-1}(n)]$ 、 $\mathbf{r}(n) = [r(n), \dots, r(n-(N-1))]$ 、 n は信号のサンプル番号、 μ は係数の更新度合いを決定するステップサイズパラメータである。式 (2.2) を繰り返し $e(n)$ が十分収束すると、 \hat{G}_v は G_v を近似した特性を得られ、事前測定ステップは完了となる。

事前測定ステップ完了後、所望位置に設置した観測マイクを取り除き、図 2.2 に示すように事前測定した空間特性 \hat{G}_v を用いて到来音 $s_t(n)$ の推定推定到来音 $\hat{s}_t(n)$ を推定する。ここで、 $\hat{s}_t(n)$ は次式 (2.3) で求められる。

$$\hat{s}_v(n) = \sum_{i=0}^{N-1} h_i r(n-i) \quad (2.3)$$

2.2 問題点

2.1 節で示した従来のバーチャルマイク法には次のような問題点がある。

- 必ず事前測定が必要であるため、事前測定時においても観測マイクを設置できない場面での応用が困難。
- 事前測定後、空間特性は固定の特性となるため、到来音推定時に空間特性が変化してしまう場合、性能が大きく劣化。

特に空間特性の変化に着目すると、周囲の気温・気圧などの変化により特性が変わってしまうほか、所望位置を到来音推定時に変更したい場合、従来の事前測定を用いた手法では適用が困難である。

図 2.3 に参照マイクから所望位置まで 1[m] として事前測定を行ったシステムについて、所望位置に対し 0.15[m] 間隔で $\pm 0.3[m]$ 移動させた場合の推定精度の例を示す。ここで、 MSE_{att} は到來音と推定音の差分の平均二乗誤差 (Mean Squared Error) の減衰量であり、値が大きいほど推定精度が高いことを示す。このように、事前測定時の所望位置から少しずれた位置でも推定精度が大きく低下してしまうことが分かる。そのため、従来のバーチャルマイク法の動作原理に基づき位置変化に適用可能なシステムを構築する場合、非常に細かい間隔で空間特性の事前測定を行う必要があり、現実的ではない。

これらの理由から、従来のバーチャルマイク法では、利用可能な条件が空間特性が変化しない場合に限られ、応用範囲が限定されてしまう。

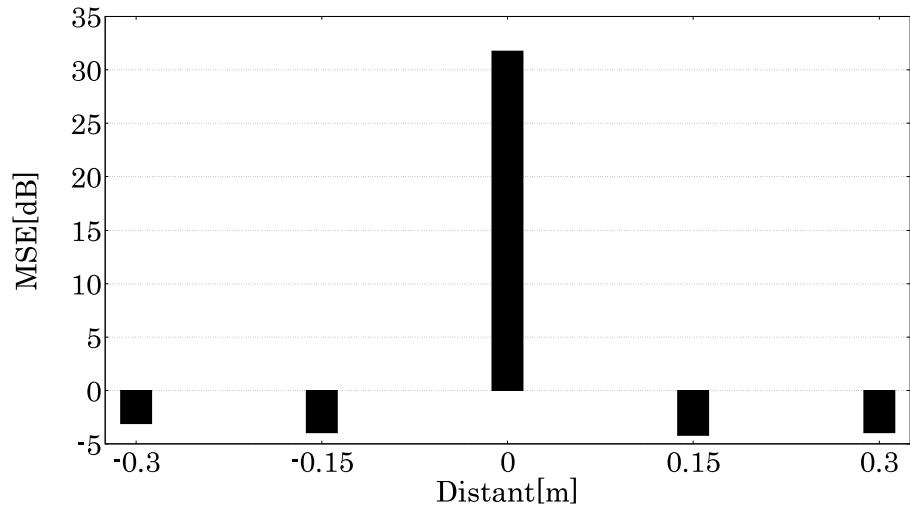


図 2.3 従来型バーチャルマイク法の距離変化に対する性能低下の例

第 3 章 提案法

3.1 システム概要

本提案法の目的は、図 3.1 に示す参照マイク M_1 から所望位置までの空間特性 G_{1t} を推定、その特性を用いて到来音を推定することである。この目標を達成するため、図 3.2 の手順に従い、マイク間特性 G_{12}, G_{13}, G_{14} と参照マイクから所望位置間までの距離 d_{1t} を用いて所望位置までの空間特性 G_{1t} を推定する。

提案法では、到来音の推定と並行して目的とする空間特性 G_{1t} の参照元である各マイク間特性 G_{12}, G_{13}, G_{14} を環境音を用いて逐次更新し続けるため、周囲の温度・気圧変化などによる空間特性の変化に適応可能である。また、所望位置までの距離情報を用いて空間特性 G_{1t} を生成するため、システム動作中の任意の時点で所望位置の変更が可能である。

なお、提案法では環境音が同心円状に広がり、直接音のみを仮定する。

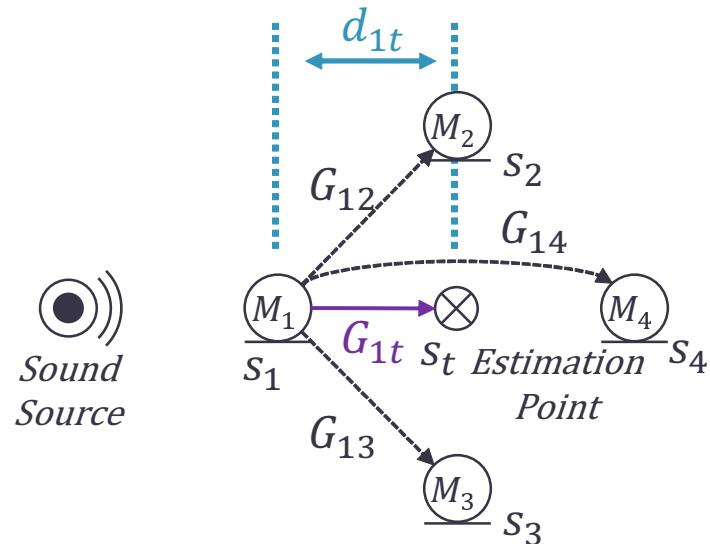


図 3.1 提案法におけるマイク配置の例

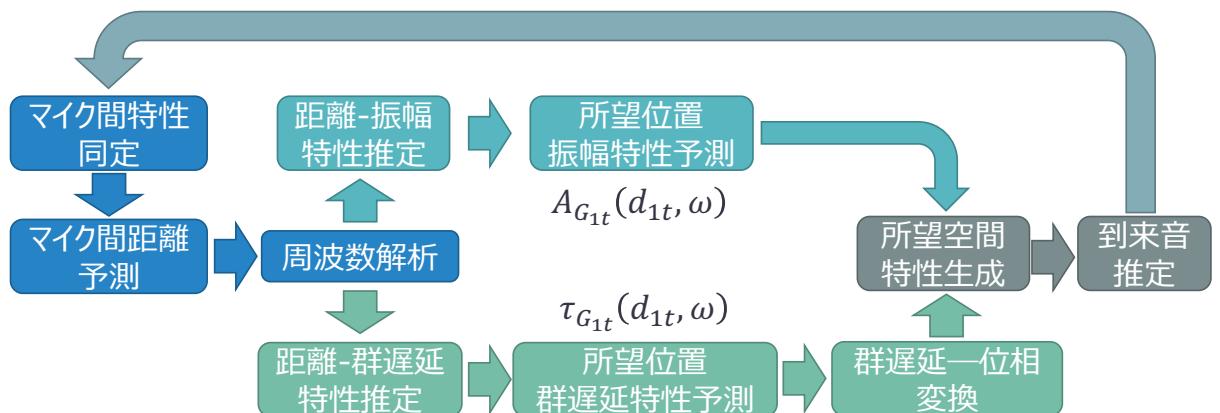


図 3.2 到來音推定の概略

3.2 マイク間特性の同定

マイク $M_1 - M_m$ 間の空間特性 G_{12}, G_{13}, G_{14} は、式 (3.1) に示す FIR フィルタでモデル化する。

$$G_{1m}(\omega) = \sum_{i=0}^{N_{1m}-1} h_i^{(1m)} e^{-j i \omega} \quad (3.1)$$

ここで、 $m = 2, 3, 4$ 、 N_{1m} はフィルタタップ数、 $h_i^{(1m)}$ はインパルス応答である。この各マイク間特性 G_{12}, G_{13}, G_{14} のインパルス応答を、図 3.3 に示すように、式 (3.2) の LMS 適応アルゴリズム [12] によって推定する。

$$\mathbf{h}^{(1m)}(n+1) = \mathbf{h}^{(1m)}(n) + \mu e_n(n) \mathbf{r}(n) \quad (3.2)$$

ここで、 $\mathbf{h}^{(1m)}(n) = [h_0^{(1m)}(n), \dots, h_{N_{1m}-1}^{(1m)}(n)]$ 、 $\mathbf{r}(n) = [r(n), \dots, r(n - (N_{1m} - 1))]$ である。

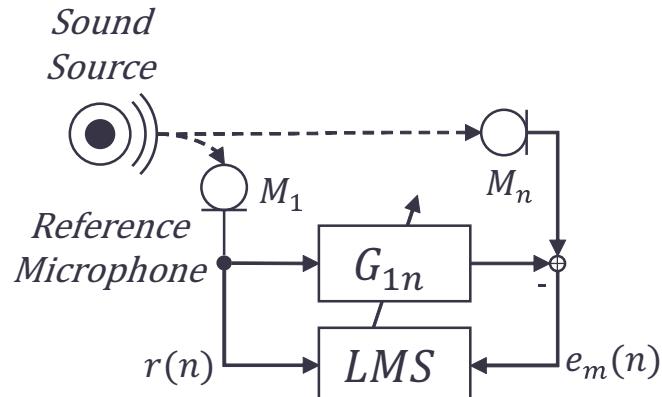


図 3.3 LMS 適応アルゴリズム

3.3 マイク間実効距離の推定

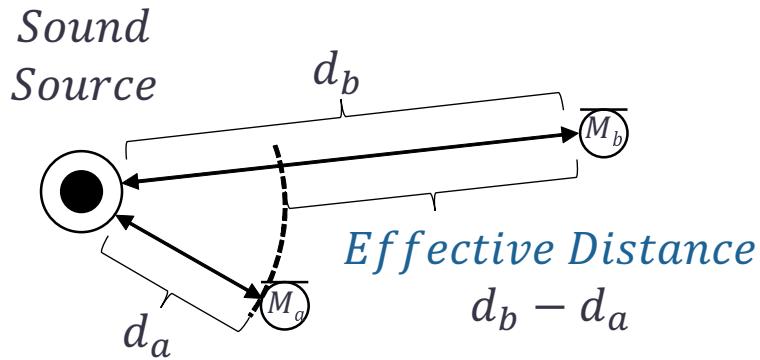


図 3.4 マイク間実効距離

3.2節で同定した各マイク間特性 G_{12}, G_{13}, G_{14} を用いて、各マイク間の実効距離 d_{12}, d_{13}, d_{14} を推定する。ここで、この実効距離は図 3.4 に示すような、マイク間の物理的距離ではなく、環境音源からそれぞれのマイクへの距離の差分である。提案法では環境音が音源より同心円状に広がることを仮定している。そのため、各マイク間の空間特性 G_{12}, G_{13}, G_{14} に含まれる諸特性(振幅・位相等)は、マイク間の物理的距離ではなく、環境音源から各マイクに到来する音響信号の時間差に起因する。そのため、本提案法ではこの時間差に着目した実効距離を用いる。

マイク間実効距離の推定は以下の手順で行う。

1. インパルス応答 $\mathbf{h}^{(1m)}$ からピークとなるインパルス応答のタップ位置 $p^{(1m)}$ を検出する。
2. 検出したタップ位置は離散化されているため、図 3.5 に示すような補間処理を行う。

補間処理では、検出したタップ位置 p_{1m} 及びその前後 1 点の合計 3 点を用いて、式 (3.3) の 2 次曲線で近似、傾きがゼロとなる点を補完ピーク位置 $p_{pa}^{(1m)}$ とする。

$$f_{pa}^{(1m)}(x) = a_2^{(1m)}x^2 + a_1^{(1m)}x + a_0^{(1m)} \quad (3.3)$$

近似には最小二乗法を用い、式 (3.4) を最小化する $a_0^{(1m)}, a_1^{(1m)}, a_2^{(1m)}$ を決定する。

$$\varepsilon_{pa} = \sum_{i=-1}^1 |h_{p_{1m}+i}^{(1m)} - f_{pa}(p_{1m} + i)|^2 \quad (3.4)$$

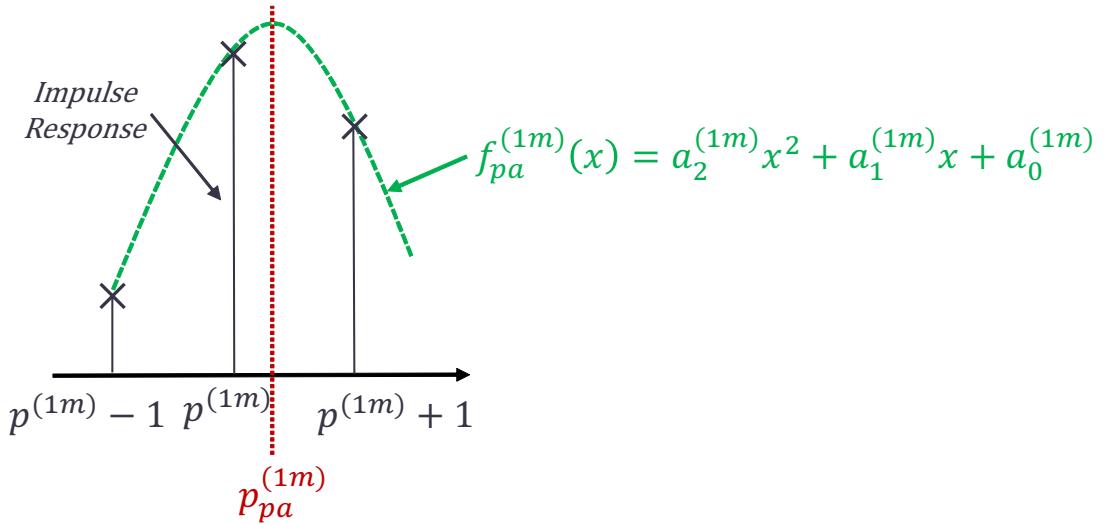


図 3.5 インパルス応答のタップ間補間

3. 決定した $a_0^{(1m)}, a_1^{(1m)}, a_2^{(1m)}$ より、式 (3.3) の傾きがゼロとなる補完ピーク位置 $p_{pa}^{(1m)}$ は次式 (3.5) で求まる。

$$p_{pa}^{(1m)} = -\frac{a_1^{(1m)}}{2a_2^{(1m)}} \quad (3.5)$$

4. 補完ピーク位置 $p_{pa}^{(1m)}$ を次式 (3.6) より距離の次元に変換する。

$$d_{1m} = \frac{p_{pa}^{(1m)}}{F_s} C_0 \quad (3.6)$$

ここで、 F_s はサンプリング周波数 [Hz]、 C_0 は音速 [m/s] である。

3.4 距離-振幅特性の推定

一般に、音圧は距離が遠くなるに従い指数関数的に減少することが知られている [10][11]。そのため、距離 d に対する振幅特性モデルは式 (3.7) に示すような指数関数減衰モデルを用いる。

$$A(d, \omega) = \alpha_G(\omega) e^{-\beta_G(\omega)d} \quad (3.7)$$

このモデルについて、3.2 節及び 3.3 節で推定した各マイク間特性 G_{12}, G_{13}, G_{14} と各マイ

ク間実効距離 d_{12}, d_{13}, d_{14} を用いて、式 (3.8) を最小化する係数 α_G, β_G を決定する。

$$\varepsilon_G(\omega_i) = \sum_{l=2}^4 | |G_{1l}(\omega_i)| - A(d_{1l}, \omega_i) |^2 \quad (3.8)$$

ここで、

$$\omega_i = \frac{i}{N_{1m}} \omega_s \quad (3.9)$$

であり、サンプリング角周波数 $\omega_s = 2\pi F_s [\text{rad/s}]$ である。

3.5 距離-群遅延特性の推定

参照マイクから所望位置までの空間特性を推定するには、3.4 節で推定した距離に対する振幅減衰特性と距離に対する位相特性が必要となる。ここで、空間特性の位相特性を解析する場合、得られる値域は 2π の不確定性を有する $-\pi < \phi \leq \pi$ の範囲に制限された特性となる。そのため、解析結果には不連続点が生じてしまう。提案法では直接音を仮定しているため、位相特性は線形モデルを用いることが可能であるが、この不連続点によって線形モデルで近似した際に不都合が生じてしまう。このような場合、図 3.6 に示すアンラップ処理によりこの不連続点の解消を行うことが一般的である。

しかし、アンラップ処理は位相の連続性を仮定した処理であるため、図 3.7 に示すような環境音がエネルギーの小さい帯域を含む場合、その帯域内では位相特性が変化せず、正

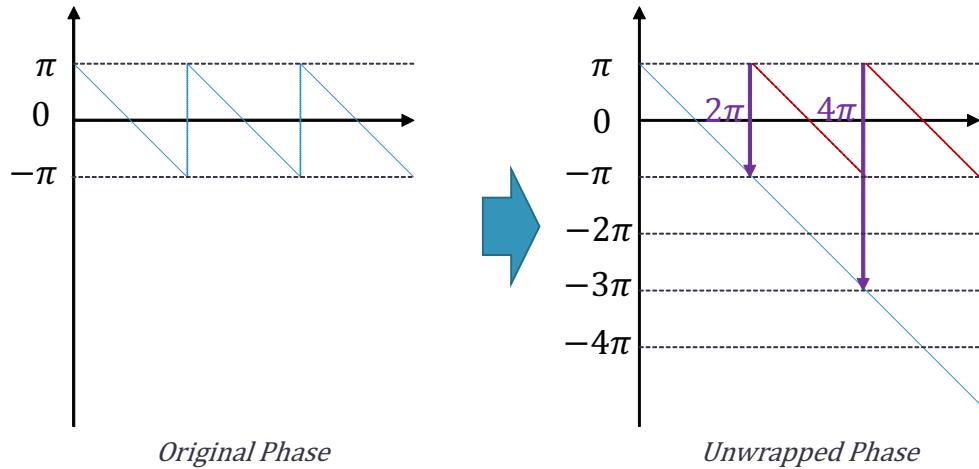


図 3.6 位相のアンラップ処理

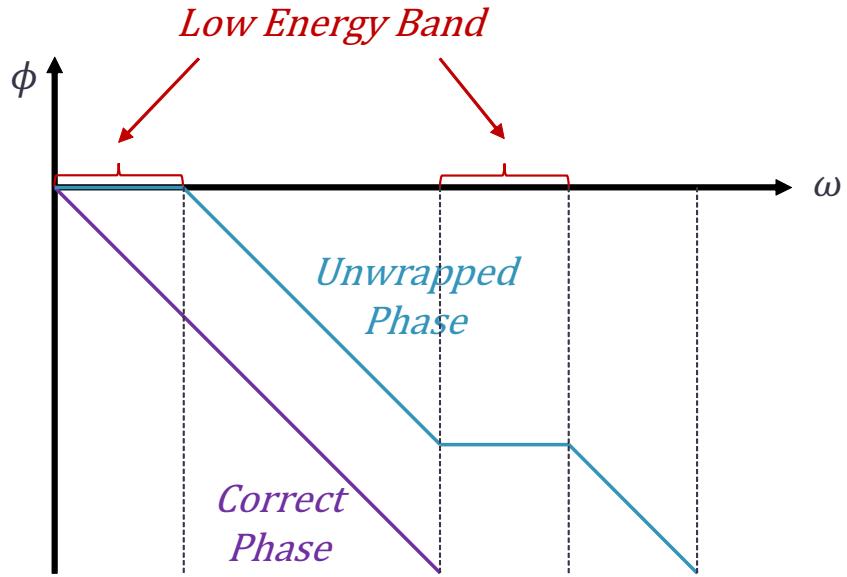


図 3.7 位相特性直接推定時に生じる問題

しい特性を得ることができない。この問題を回避するため、提案法では群遅延特性を介して位相特性を推定する手法を用いる。そのため、ここでは距離に対する群遅延特性の推定を行う。

提案法では直接音のみを仮定しているため、距離に対する群遅延特性は、式 (3.10) に示す線形モデルを用いる。

$$\tau(d, \omega) = \alpha_{gd}(\omega)d \quad (3.10)$$

このモデルについて、3.2 節及び 3.3 節で推定したマイク間特性 G_{12}, G_{13}, G_{14} と実効距離 d_{12}, d_{13}, d_{14} を用いて、次式 (3.11) を最小化する係数 α_{gd} を決定する。

$$\varepsilon_{gd}(\omega_i) = \sum_{l=2}^4 |f_{gd}(G_{1l}(\omega_i)) - \tau(d_{1l}, \omega_i)|^2 \quad (3.11)$$

ここで、 $f_{gd}(G_{1l}(\omega_i))$ は $G_{1l}(\omega_i)$ の群遅延である。

3.6 所望位置振幅・位相特性の推定

3.4 節及び 3.5 節で決定した係数 $\alpha_G, \beta_G, \alpha_{gd}$ と参照マイクから所望位置までの距離 d_{1t} を用いて式 (3.12) 及び式 (3.13) より、所望位置における振幅・群遅延特性 $A_{G_{1t}}, \tau_{G_{1t}}$ を推定する。

$$A_{G_{1t}}(d_{1t}, \omega) = \alpha_G(\omega)e^{-\beta_G(\omega)d_{1t}} \quad (3.12)$$

$$\tau_{G_{1t}}(d_{1t}, \omega) = \alpha_{gd}(\omega)d_{1t} \quad (3.13)$$

以上より、参照マイクから所望位置までの振幅及び群遅延特性を得ることができる。

しかし、ここで推定した群遅延特性に注目すると、図 3.8 に示すように、特性に誤差(ばらつき)が含まれる。また、環境音にエネルギーの弱い帯域がある場合、図 3.9 に示すように帯域内において有効な特性が得られず、振幅の変化が急峻な部分や帯域端において群遅延特性にリップルが発生する。結果として、得られる位相特性にも大きな誤差が生じてしまう。

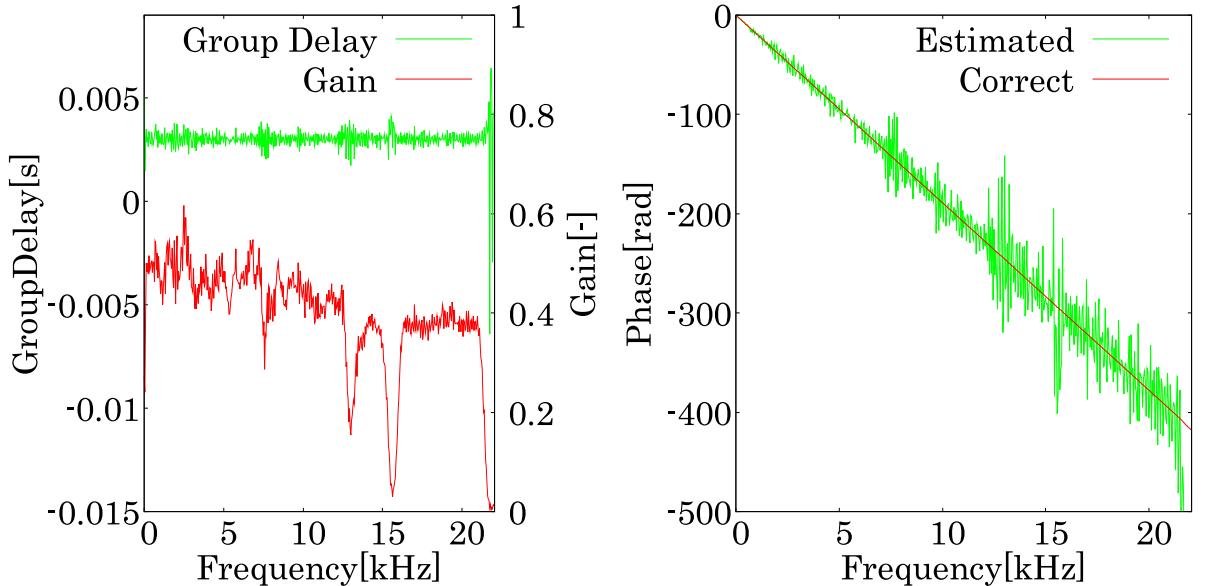


図 3.8 群遅延特性の誤差(帯域制限なし)

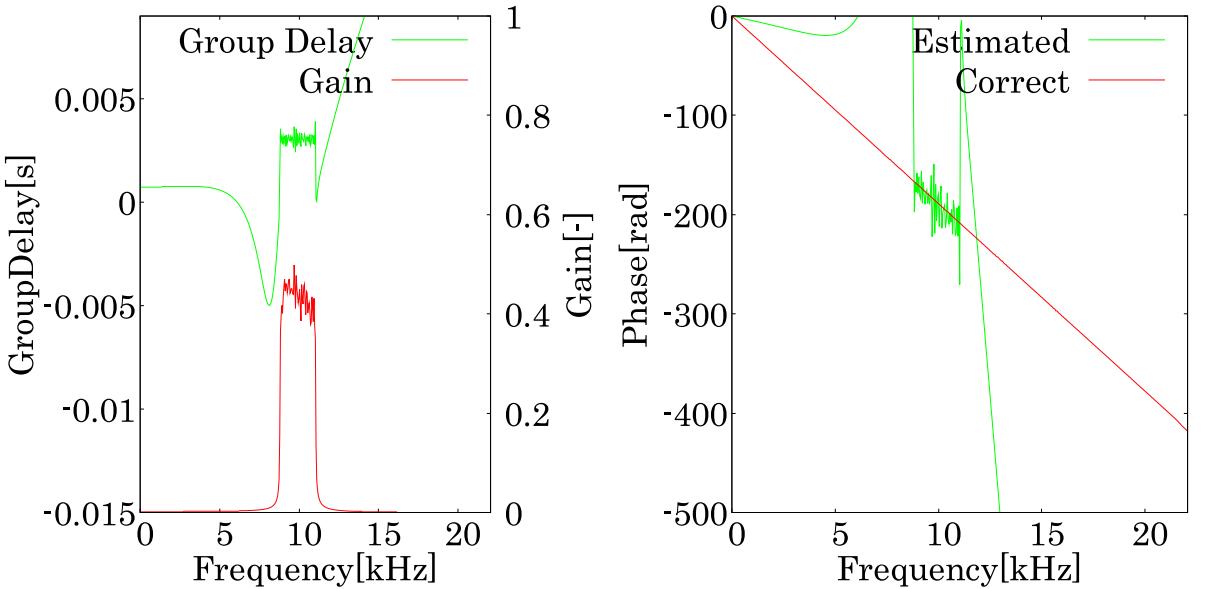


図 3.9 群遅延特性の誤差 (通過帯域:8.82~11.0[kHz])

そのため、以下の手順に従い、推定した群遅延特性 $\tau_{G_{1t}}$ について、有効な群遅延特性の検出と平均化処理を行い平均群遅延特性 $\bar{\tau}_{G_{1t}}$ を決定する。

1. 帯域制限された領域のデータを除外を行う。十分な振幅を有する点における群遅延のデータは信頼性が高い。このことより、閾値 A_{th} を設定し、推定した所望位置の振幅特性 $A_{G_{1t}}$ と比較、 A_{th} を超えた点の群遅延特性を有効データとし、それ以外のデータを無効として除外する。ここで得られた有効な群遅延特性のデータを $\boldsymbol{\tau}_{th} = [\tau_0, \dots, \tau_{N_{gd}^{(th)} - 1}]$ 、そのデータ数を $N_{gd}^{(th)}$ とする。
2. 前述の処理で得られたデータより、分散 σ_{gd}^2 を求める。

$$\sigma_{gd}^2 = \frac{1}{N_{gd}^{(th)}} \sum_{i=0}^{N_{gd}^{(th)}-1} (\tau_i - \tau_{ave})^2 \quad (3.14)$$

ここで、 τ_{ave} は $\boldsymbol{\tau}_{th}$ の平均であり、

$$\tau_{ave} = \frac{1}{N_{gd}^{(th)}} \sum_{i=0}^{N_{gd}^{(th)}-1} \tau_i \quad (3.15)$$

で得られる。

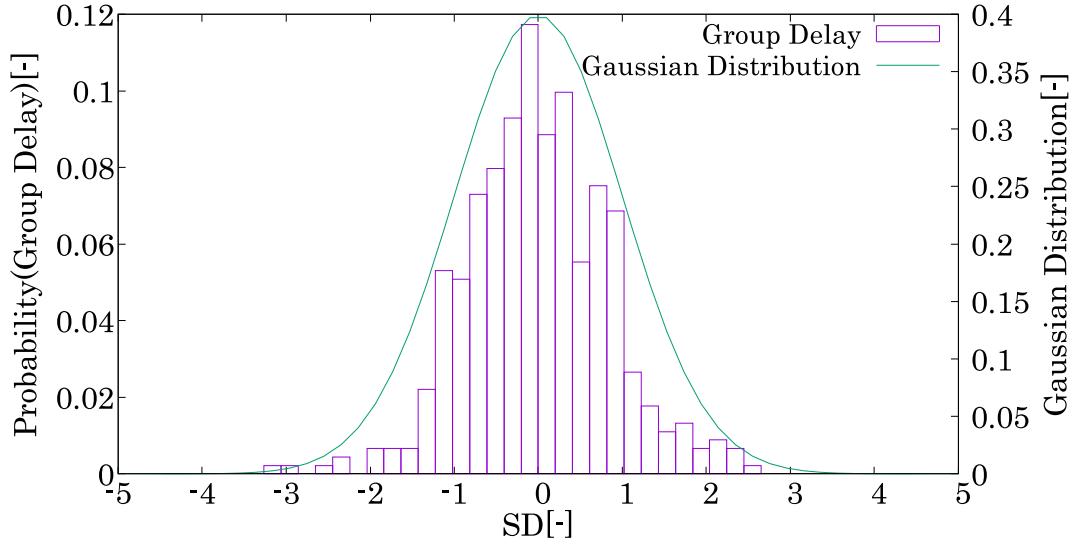


図 3.10 群遅延の分布例

3. 群遅延特性のリップルを除去するため、 τ_{th} のそれぞれのデータについて、 τ_{ave} と偏差を求め、その偏差が $\pm \alpha_{gd} \sigma_{gd}$ を超えるデータを τ_{th} から除外、残った群遅延特性のデータを $\tau_{eff} = [\tau_0^{(eff)}, \dots, \tau_{N_{eff}-1}^{(eff)}]$ 、その数を N_{eff} として平均群遅延特性 $\bar{\tau}_{G_{1t}}$ を求める。

$$\bar{\tau}_{G_{1t}} = \frac{1}{N_{eff}} \sum_{i=0}^{N_{eff}-1} \tau_i^{(eff)} \quad (3.16)$$

なお、 α_{gd} はデータの信頼区間を決定する係数である。

ここで、帯域制限を行わない白色雑音について解析した τ_{th} の分布例を図 3.10 に示す。このように、有効データの分布はおおよそ正規分布に従うため、本提案法では正規分布の 95[%] 信頼区間である $\pm 2\sigma_{gd}$ を有効なデータの範囲として、 $\alpha_{gd} = 2.0$ と設定する。

以上より、決定した平均群遅延特性 $\bar{\tau}_{G_{1t}}$ を次式 (3.17) より位相に変換し、所望位置における位相特性 $\phi_{G_{1t}}(d_{1t}, \omega)$ を得る。

$$\phi_{G_{1t}}(d_{1t}, \omega) = -\bar{\tau}_{G_{1t}}\omega \quad (3.17)$$

3.7 所望空間特性推定・到来音予測

参照マイクから所望位置までの空間特性 G_{1t} は次式 (3.18) で表される。

$$G_{1t}(\omega) = \sum_{i=0}^{N_{1t}-1} h_i^{(1t)} e^{-j i \omega} \quad (3.18)$$

この空間特性 G_{1t} について、対応するインパルス応答 $h_i^{(1t)}$ をこれまでに推定した振幅・位相特性 $A_{G_{1t}}(\omega), \phi_{G_{1t}}(\omega)$ より、逆フーリエ変換を用いて求める。

最終的に生成された $h_i^{(1t)}$ を用いて推定到来音 $\hat{s}_t(n)$ は式 (3.19) で推定される。

$$\hat{s}_t(n) = \sum_{i=0}^{N_{1t}-1} h_i^{(1t)} s_1(n-i) \quad (3.19)$$

以上の処理を図 3.2 に示すように繰り返し、空間特性を逐次更新し続けながら所望位置の到来音を推定する。

第 4 章 実験

4.1 実験条件

実験に用いる音響信号の録音は無響室で行い、環境音源には無指向性エンクロージャー WP-SP083MSF(Wonder Pure 製)+フルレンジスピーカ FE83En(FOSTEX) を用いた。提案法における各実験で共通する実験条件は表 4.1 に示す。

評価指標には、次式 (4.1) に示す到來音 s_t と推定到來音 \hat{s}_t の差分の MSE 減衰量である MSE_{att} [dB] を用いる。

$$MSE_{att} = 10 \log_{10} \left(\frac{1}{N_{tr}} \sum_{i=0}^{N_{tr}-1} s_{t_i}^2 \right) - 10 \log_{10} \left(\frac{1}{N_{tr}} \sum_{i=0}^{N_{tr}-1} (s_{t_i} - \hat{s}_{t_i})^2 \right) \quad (4.1)$$

この値が大きいほど、推定精度が高いことを示す。

なお、所望位置までの空間特性推定に用いるマイク間空間特性はマイク M_x - M_y 間の空間特性を G_{xy} と記し、各実験について個別で示す。

表 4.1 共通実験条件

| | |
|---------------------------|-----------------|
| サンプリング周波数 | 44.1[kHz] |
| 適応アルゴリズム | LMS |
| ステップサイズ | 0.005 |
| フィルタタップ長 | 1024 |
| 有効群遅延帯域検出閾値 A_{th} | 0.3 |
| 群遅延信頼区間決定定数 α_{gd} | 2.0 |
| 環境音 | 白色雑音(帯域制限なし・あり) |
| MSE 平均数 N_{tr} | 5 |
| 無響室内気温 | 11.1[°C] |

4.2 比較対象

比較対象として、第2章で述べた従来型のバーチャルマイク法を採用した。空間特性の事前測定条件は表4.2に示したとおりである。

表4.2 事前測定条件

| | |
|-----------|-----------|
| サンプリング周波数 | 44.1[kHz] |
| 適応アルゴリズム | LMS |
| ステップサイズ | 0.005 |
| フィルタタップ長 | 1024 |
| 測定時間 | 60.0[s] |
| 測定音 | 白色雑音 |
| 特性平均回数 | 50 |

4.3 実験結果

4.3.1 推定精度比較

提案法における到來音の推定精度を検証するため、従来法との推定精度の比較を行った。4.3.1.1 項では、帯域制限されていない環境音における性能比較、4.3.1.2 項では、帯域制限された環境音における性能比較の結果を示す。マイクの配置は図 4.1 及び図 4.2 に示す配置を採用した。なお、システムの実行時間は 15.0[s]、推定に用いるマイク間空間特性は G_{12}, G_{13}, G_{14} の 3 つとして推定を行った。

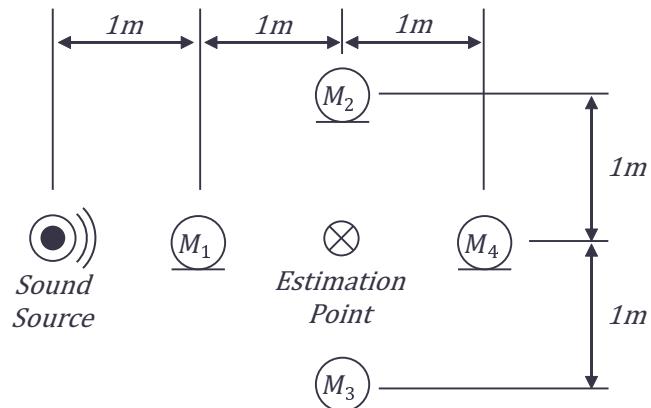


図 4.1 マイク配置パターン 1

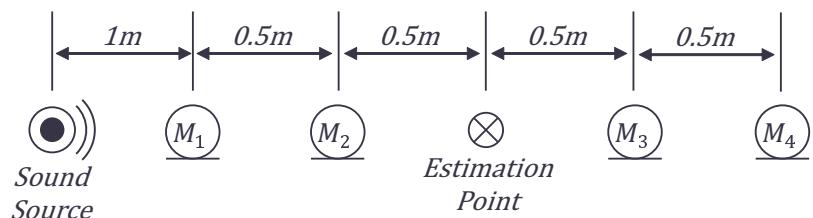


図 4.2 マイク配置パターン 2

4.3.1.1 帯域制限なし

各マイク配置パターンにおける MSE 推移、推定振幅・位相特性を図 4.3 から図 4.8 に示す。また、最終 0.1[s](4410[sample]) 間における MSE 減衰量の平均を表 4.3 に示す。

図 4.3 及び図 4.4 より、提案法では時間の経過とともに MSE が減少、推定精度が向上していることが分かる。また、表 4.3 より、推定精度は従来法に劣るものの、事前測定を必要としない提案法でも到来音の推定が可能であることが確認された。

一方で、マイクの配置パターンについて比較すると、従来法では両パターン共に高い推定精度であったが、提案法では直線配置である設置パターン 2 がより高い推定精度を示していた。図 4.7 及び図 4.8 に示す位相特性を比較すると、両設置パターンにおいて提案法と従来法で似た特性が得られていることが分かった。しかし、図 4.5 及び図 4.5 に示す振幅特性を確認すると、直線配置である設置パターン 2 については良く推定されていたが、設置パターン 1 については大きな誤差が確認された。

これは、環境音源に用いたスピーカが簡易的な無指向性スピーカであったため、提案法における環境音は音源から同心円状に広がるという仮定を満たしていなかったためだと考えられる。

そのため、以降の実験では環境音源の指向性の影響を受けにくい直線配置での評価を行うこととする。

表 4.3 MSE 減衰量

| マイク配置パターン | 提案法 [dB] | 従来法 [dB] |
|-----------|-----------|-----------|
| パターン 1 | 10.828817 | 32.685078 |
| パターン 2 | 15.606003 | 32.493541 |

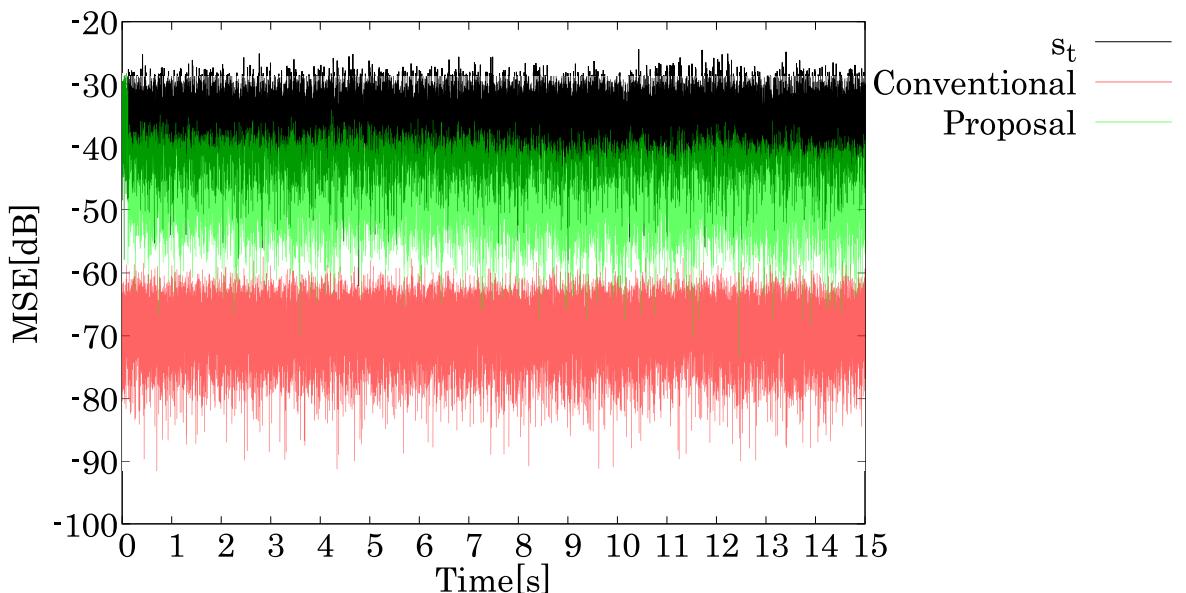


図 4.3 MSE 推移 (マイク設置パターン 1)

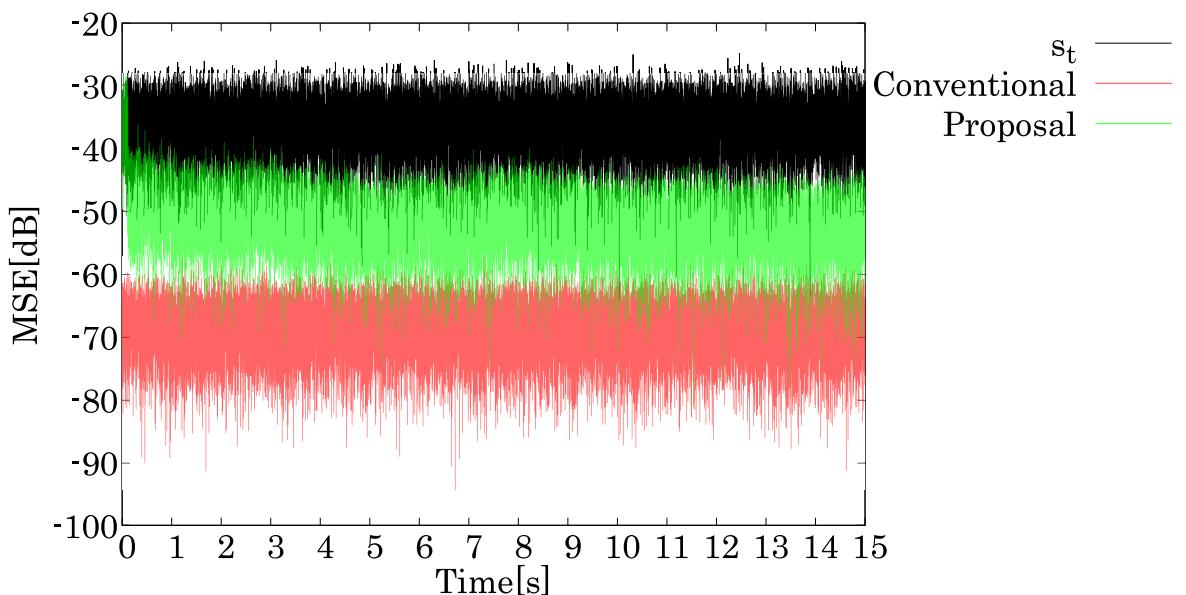


図 4.4 MSE 推移 (マイク設置パターン 2)

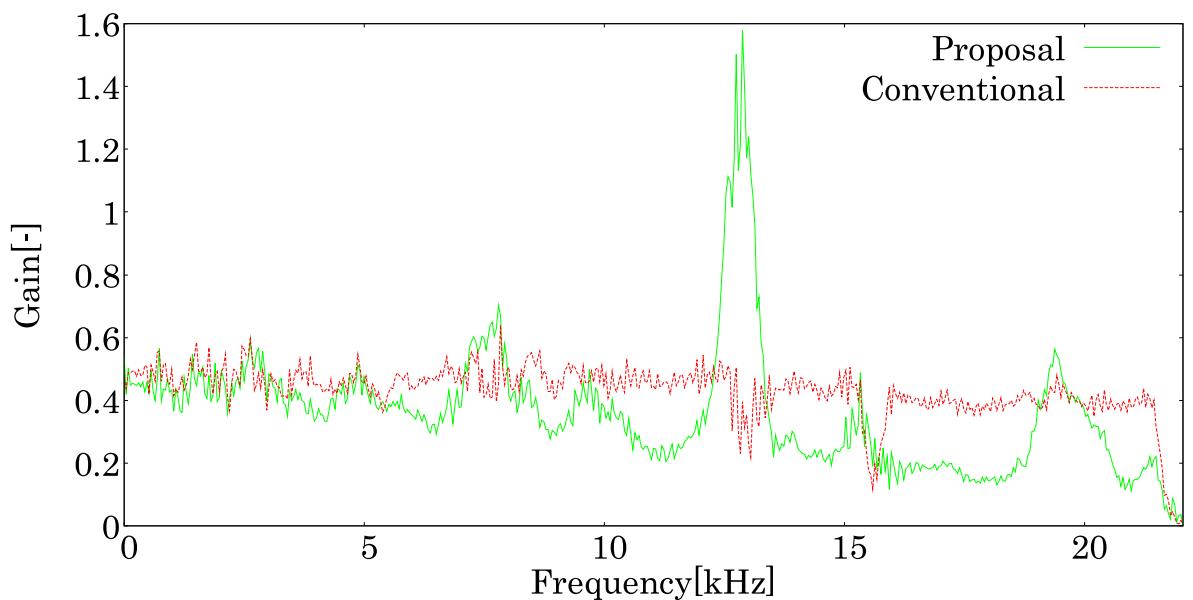


図 4.5 振幅特性(マイク設置パターン1)

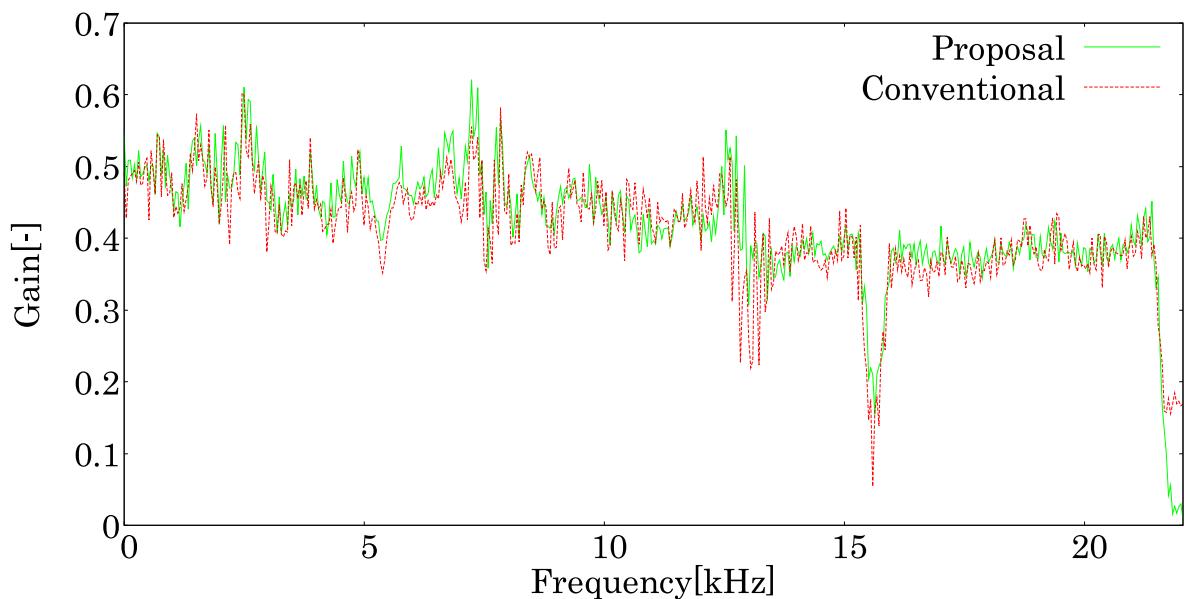


図 4.6 振幅特性(マイク設置パターン2)

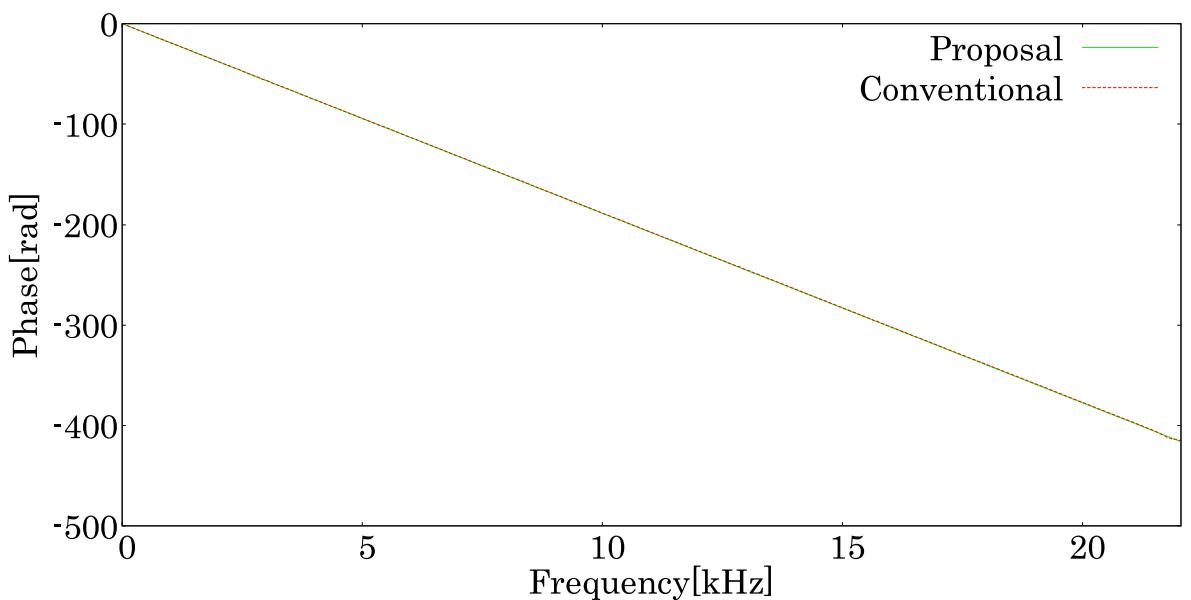


図 4.7 位相特性(マイク設置パターン1)

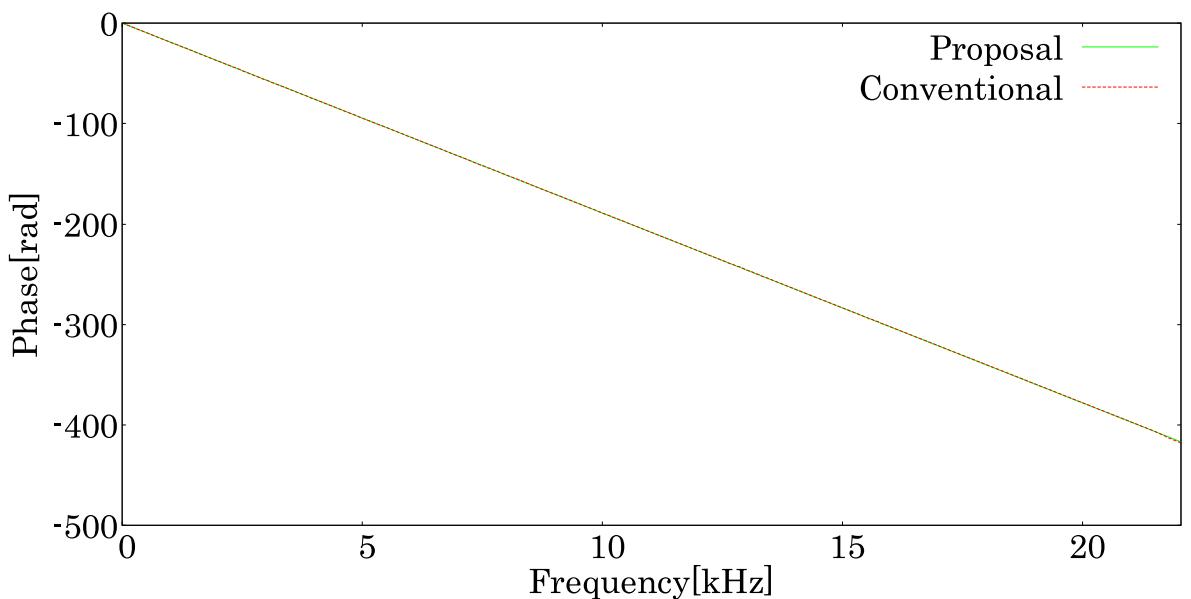


図 4.8 位相特性(マイク設置パターン2)

4.3.1.2 帯域制限あり

白色雑音に対し、帯域制限を行った音源を環境音として用いた場合における、各帯域のMSE減衰量を図4.9に示す。

従来法では、全帯域について比較的安定した推定精度を有していた。一方、提案法では高域側で推定精度が低下しやすい傾向が確認された。

ここで、各制限帯域における振幅及び位相特性の推定精度について考察する。

振幅特性は式(4.2)に示す、従来法における事前測定を行った所望位置までの空間特性を真値とした平均二乗誤差である $MSE_{gain}[\text{dB}]$ で評価する。

$$MSE_{gain} = 10 \log_{10} \sum_{i=N_{start}}^{N_{end}} (A_c(\omega_i) - A_p(\omega_i))^2 \quad (4.2)$$

なお、上式は環境音の帯域制限における通過域を $\omega_{N_{start}}$ から $\omega_{N_{end}}$ とした場合の通過域内の平均二乗誤差である。 $A_c(\omega)$ は事前測定を行った空間特性の振幅特性、 $A_p(\omega)$ は提案法で推定した空間特性の振幅特性であり、 MSE_{gain} の値が小さいほど推定精度が高いことを示す。

また、位相特性は各周波数において位相が真値に対し π (半周期)ずれると、逆位相となり推定精度が劣化することに着目し、式(4.3)で示す位相誤差率 $err_\phi(\omega_i)[\%]$ で評価する。

$$err_\phi(\omega_i) = \left| \frac{\phi_c(\omega_i) - \phi_p(\omega_i)}{\pi} \times 100 \right| \quad (4.3)$$

ここで、 $\phi_c(\omega)$ は事前測定を行った空間特性の位相特性、 $\phi_p(\omega)$ は提案法で推定した空間特性の位相特性であり、位相が π ずれると誤差率は 100[%]となる。

図4.10に各制限帯域における振幅特性の平均二乗誤差を示す。また、図4.11に位相特性の誤差率を、図4.12に各制限帯域における位相特性の平均誤差率を示す。

図4.10より、振幅特性は制限帯域と関連性を示すような推定精度の変化は認められず、4.3.1.1項で行った帯域制限なしの結果を含め、概ね一定の推定精度を有していた。

一方、図4.11より、位相特性の誤差率は各制限帯域において、高域になるほど悪化する傾向が確認された。また、図4.9で推定精度が低下している帯域と、図4.12に示した位相特性の平均誤差率が低下している帯域は概ね一致することが確認された。

以上より、到來音の推定精度の低下は位相特性の推定精度に起因すると考えられる。

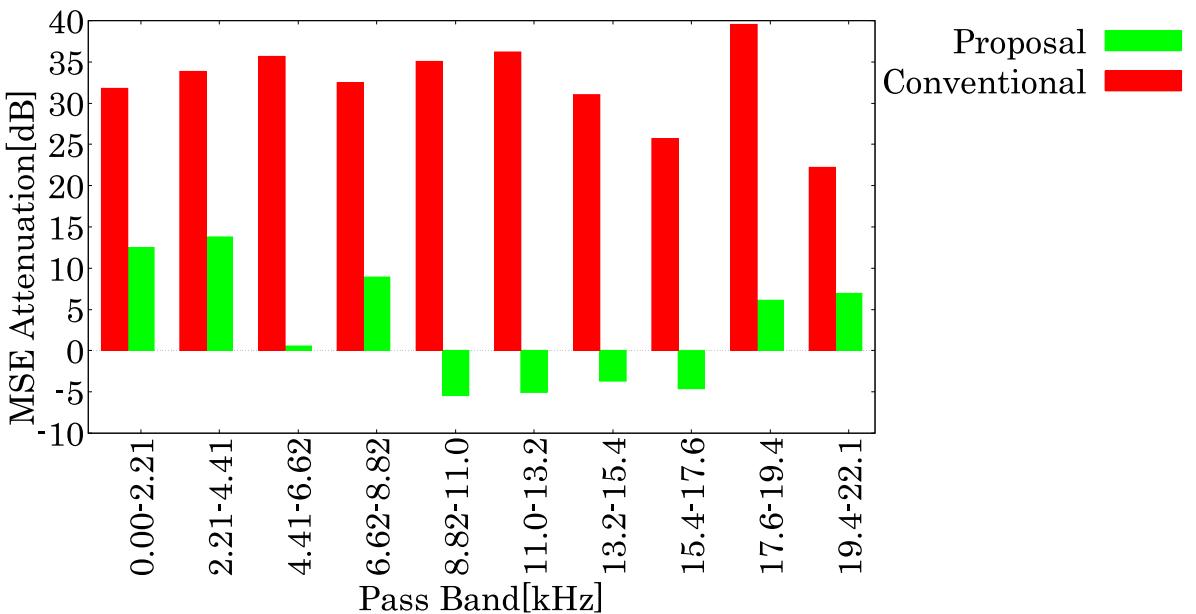


図 4.9 帯域制限された環境音下における MSE 減衰量

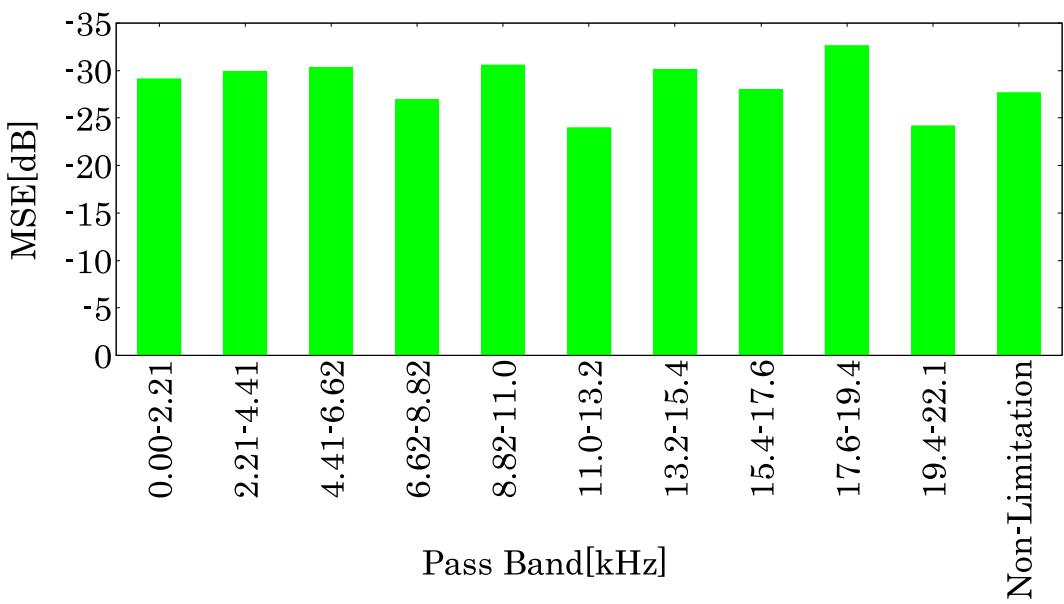


図 4.10 各制限帯域における振幅特性の推定精度

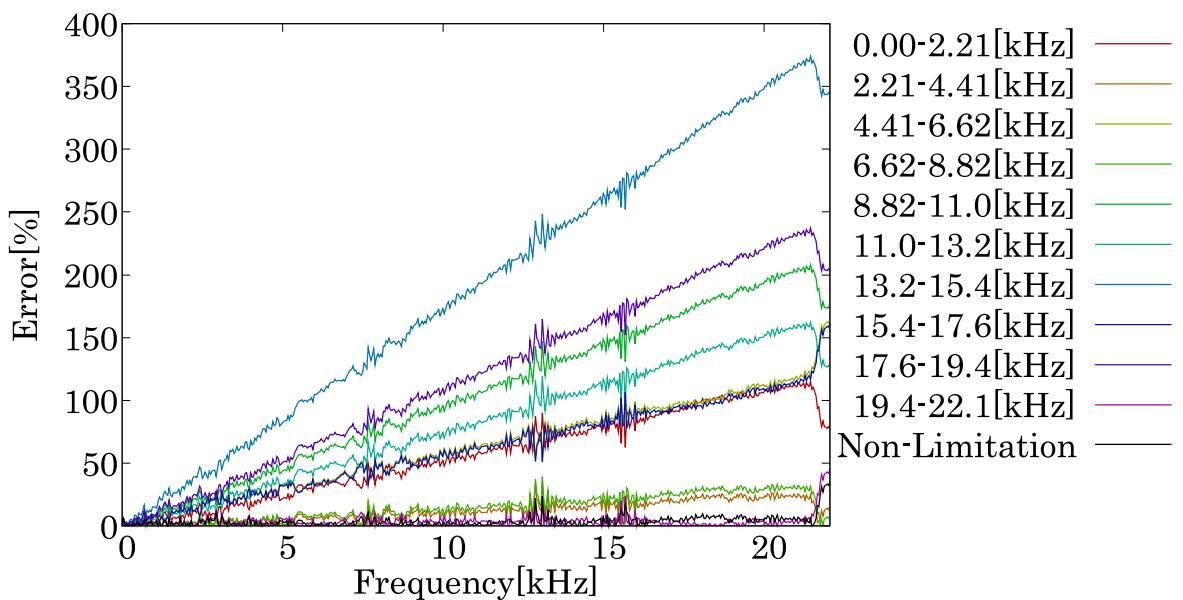


図 4.11 位相特性の誤差率

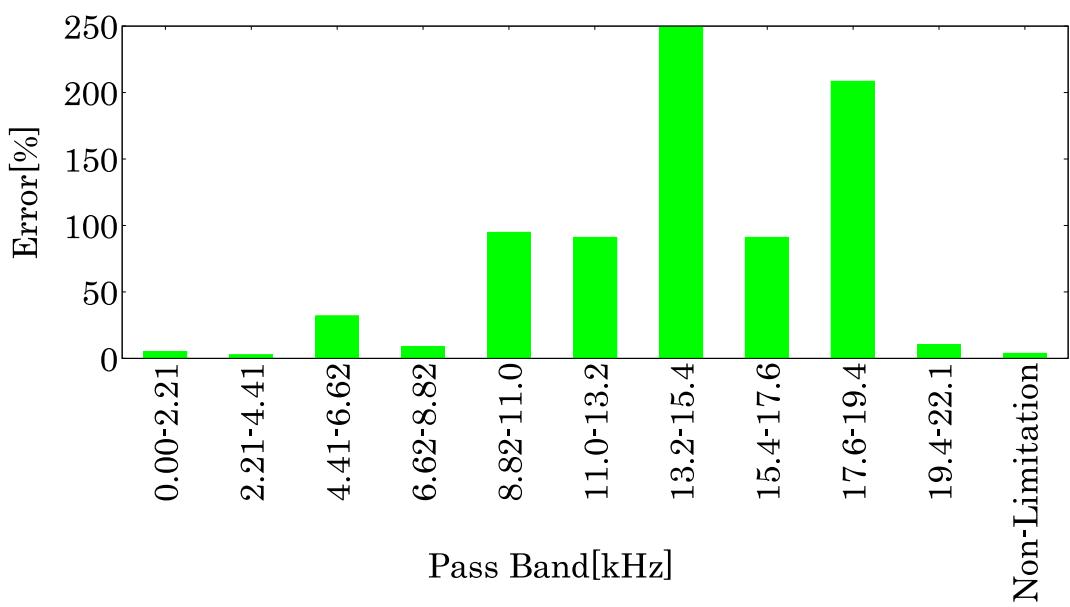


図 4.12 各制限帯域における位相特性の平均誤差率

4.3.2 所望位置変更に対する推定精度変化

システム動作中の所望位置変更に対する推定精度の確認を行った。マイクの設置パターンは図 4.13 に示す。本実験では、システムの実行時間を 30.0[s] とし、初めの 15.0[s] は所望位置 A、15.0[s] から 30.0[s] の間は所望位置 B について推定を行った。また、従来法における空間特性の事前測定は所望位置 A について行った。なお、推定に用いるマイク間空間特性は G_{12}, G_{14}, G_{24} の 3 つとして推定を行った。

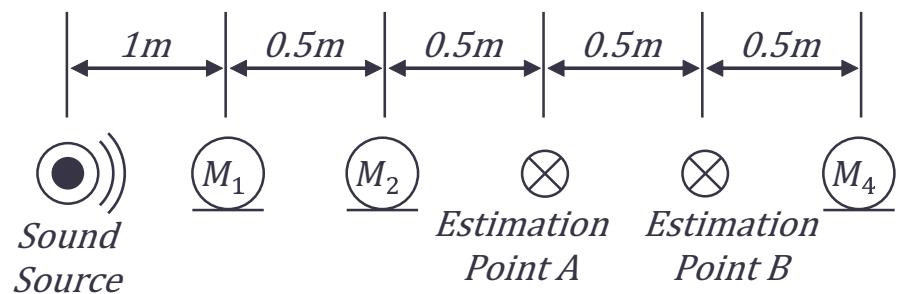


図 4.13 マイク配置パターン

図 4.14 に MSE の推移を、表 4.4 に MSE 減衰量を示す。従来法では、事前に空間特性を測定した所望位置 A における推定精度は高いが、事前測定を行わなかった所望位置 B については推定精度が大きく低下していることが分かった。

一方、提案法では所望位置 A,B ともに推定精度を維持していた。そのため、提案法は所望位置変更による空間特性の変化に頑健であることが確認された。

表 4.4 MSE 減衰量

| 推定位置 | 提案法 [dB] | 従来法 [dB] |
|--------|-----------|-----------|
| 所望位置 A | 12.906824 | 32.493541 |
| 所望位置 B | 8.734645 | -4.738134 |

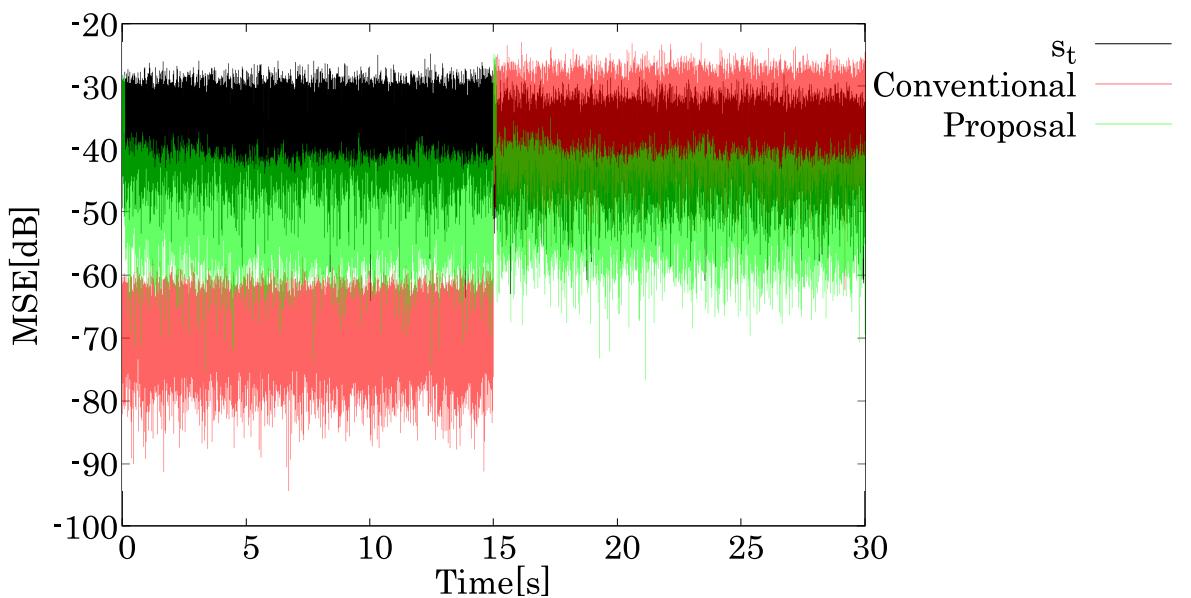


図 4.14 所望位置変更に対する MSE 推移

第5章 おわりに

5.1 まとめ

本論文では、空間特性の事前測定を必要とせず、空間特性の変化に頑健なバーチャルマイク法の提案した。第1章では、近年発展したリアルタイム信号処理について述べ、本論文の研究目的について述べた。第2章では、現在研究されているバーチャルマイク法の基本原理とその問題点について述べた。第3章では、本論文の提案法である空間特性の事前測定を必要としないバーチャルマイク法の原理について述べた。提案法では、到來音を推定したい所望位置周辺に複数のマイクを設置、そのマイク間空間特性から所望位置までの空間特性を予測する。このマイク間空間特性の同定には環境音を用いて行い、マイク間空間特性より距離に対する振幅、群遅延特性の変化を推定、参照マイクから所望位置までの距離情報より所望位置までの空間特性を予測する。所望位置までの空間特性を生成する元となるマイク間空間特性は環境音を用いて到來音の予測と並行して逐次更新されるため、温度や気圧変化による空間特性変化に頑健である。また、所望位置までの距離情報を用いているため、システム動作中の任意のタイミングで所望位置を変更可能である。第4章では、実験より提案法の有用性を確認した。比較対象として第2章で説明した従来型のバーチャルマイク法を採用した。帯域制限を行わない白色雑音を用いた推定精度比較の結果、提案法は従来法に比べ推定精度が劣るが、空間特性の事前推定を行わずに到來音の予測が可能であることが確認された。帯域制限を行った白色雑音を用いた推定精度比較では、従来法では全帯域において安定した推定精度を維持していた一方、提案法では特に高帯域において、推定精度の低下が確認された。これは、高域側では位相特性の推定誤差の影響が大きいためだと考えられる。また、所望位置変更に関する実験では、従来法は事前に空間特性を測定した位置においては高い推定精度を維持していたが、事前測定を行っていない位置では性能が大きく低下していることが確認された。一方、提案法は所望位置が変更された場合でも到來音の推定が可能であることが確認された。これより、提案法は所望位置変更による空間特性の変化にも頑健であることが確認された。

5.2 今後の課題

本論文の実験結果より、提案法では特に高域側における到来音の予測精度が低いことが確認された。これは、位相特性の推定精度によるものだと考えられるため、この位相特性の推定精度を向上させることが重要であると考えられる。

また、提案法では残響のない空間を仮定していたが、実環境では残響を無視できる場面は稀である。そのため、残響を考慮できるように空間モデル(振幅・位相変化など)の変更や、音圧にベクトルの概念を取り入れた音響インテンシティ[13][14]等を用いて空間の音響信号の流れ着目した手法を取り入れることが課題となる。

謝辞

本研究を行うにあたり、研究や本論文に関し適切なご指導を頂いた杉田泰則准教授に深く感謝いたします。また、本論文の審査において貴重なご助言を頂いた岩橋政宏教授、ならびに坪根正准教授に感謝いたします。さらに、研究生活においてお世話になりました、信号処理応用研究室の皆様に感謝の意を表します。最後に、長きにわたり様々な面で支えていただきました両親に深く感謝いたします。

平成31年2月

参考文献

- [1] 松岡真二, 北川孟, 堀畠聰, 石光俊介, 田村史雄, ”バーチャル・マイク法アクティブ・ノイズ制御(適用条件に関する基礎的解析)”, 日本機械学会論文集(C編), 62巻, 601号, pp.81-86, Sep. 1996
- [2] Shoma Edamoto, Chuang Shi, Yoshinobu Kajikawa, ”Virtual Sensing Technique for Feedforward Active Noise Control”, Proceedings of Meetings on Acoustics, Volume 29, Issue 1, Jun. 2017
- [3] 宮崎信浩, 梶川嘉延, ”バーチャルマイクロホンを用いたフィードバック ANC システムに関する検討”, 電子情報通信学会技術研究報告:信学技報, 112巻, 49号, pp.59-64, May 2012
- [4] 近藤大介, 雉本信哉, 松田浩一, 木庭洋介, ”仮想マイク法を用いたアクティブ遮音壁による騒音制御”, 日本機械学会 第20回環境工学総合シンポジウム 2010 講演論文集, 20巻, pp.16-19, Mar. 2010
- [5] Xiangbin Mu, JaeYeol Rheem, ”Quiet Zone Enhancement for a Target Location Using an Improved Virtual Sensing Algorithm”, Electronics, Volume 6, Issue 4, Dec. 2017
- [6] Marek Pawelczyk, ”Adaptive noise control algorithms for active headrest system”, Control Engineering Practice, Volume 12, Issue 9, pp.1101-1112, Sep. 2004
- [7] Seokhoon Ryu, Young-Sup Lee, ”Characteristics of Relocated Quiet Zones Using Virtual Microphone Algorithm in an Active Headrest System”, Journal of Sensors, Volume 2016, Mar. 2016
- [8] Shun Hirose, Yoshinobu Kajikawa, ”Effectiveness of Headrest ANC System with Virtual Sensing Technique for Factory Noise”, Proceedings of Asia-Pacific Signal and Information Processing Association Annual Summit and Conference 2017, pp.464-468, Dec. 2017
- [9] 木庭洋介, 近藤大介, 雉本信哉, ”騒音の入射方向情報を用いた仮想マイクロホン法による能動音響制御”, 日本機械学会論文集B編, 78巻, 789号, pp.954-958, May 2012

- [10] "ISO 9613-1:Acoustics-Attenuation of sound during propagation outdoors-Part 1:Calculation of the absorption of sound by the atmosphere", International Organization for Standardization, Jun. 1993
- [11] 吉田光一, "屋外の音の伝搬における空気吸収の計算 (ISO9613-1について)", 騒音制御, 21巻, 3号, pp.130-135, Jun. 1997
- [12] 西村正治, 宇佐川毅, 伊勢史郎, "アクティブノイズコントロール", 日本音響学会, pp.69-73, コロナ社, 2008
- [13] S. Gade, "Sound Intensity(Part 1 Theory)", B&K Technical Review 3, pp.3-39, 1982
- [14] S. Gade, "Sound Intensity(Part 2 Instrumentation and Applications)", B&K Technical Review 4, pp.3-32, 1982

発表文献

- (1) 坂井優斗, 杉田泰則, "未推定経路に適用可能なバーチャルマイクに関する一検討", 電子情報通信学会信越支部大会講演論文集, 1C-5, p.13, Sep. 2018