

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 5 年 5 月 19 日現在

機関番号：32407

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2020～2022

課題番号：20K04540

研究課題名(和文) 屋内でのシームレスな消音を実現する超指向性スピーカを用いた多チャンネルANCの開発

研究課題名(英文) Development of Multi-Channel ANC Using Super-Directional Speakers for Seamless Silence in Indoor Environments

研究代表者

木許 雅則 (Kimoto, Masanori)

日本工業大学・基幹工学部・准教授

研究者番号：80315126

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：ANCは騒音と同振幅逆位相の制御音を生成し、能動的に騒音を消去する技術である。従来法の多くは消音制御点で有効な消音量が得られるが、非制御地点では同位相の音の干渉が生じて騒音が増大する。また、スピーカと消音制御点間の伝搬経路(二次経路)が変化する環境では消音動作が不安定となる等、一般的な屋内環境での利用は困難である。本研究では多チャンネルの超指向性スピーカを用いたANCシステムの開発を行い、これらの問題の解決を行った。スピーカの特性を活かした非制御地点での音圧増加の抑制、二次経路の簡易推定法及びチャンネル間音圧制御法の構築により、屋内環境の変化に対しても安定した消音を実現可能なことを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

既存のANCは、特定の環境や様々な制約条件下に動作が限定されるため、公共施設やオフィス、一般家屋など、一般の人々が利用する環境への適用には至っていない。既存研究では一般的なスピーカを用いたシステムの他に超指向性スピーカを用いた先行研究が数種あるが、それらは単チャンネルでの基礎研究が多く、実環境への適用には様々な課題が残る。本研究では超指向性スピーカを用いた多チャンネル系を構築することで、既存ANCの問題点である非制御点での騒音増大及び二次経路変動によるシステムの不安定化を効果的に解決した。実用化には幾つかの解決すべき項目が残るものの、使用環境の制約が少ない一般性を持つ騒音除去システムを実現した。

研究成果の概要(英文)：ANC generates a control sound with the same amplitude and opposite phase as the noise, and actively cancels the noise. Most of the conventional methods can obtain an effective amount of silence suppression at the muffing control point, but noise increases at the non-control point due to the interference of in-phase sounds. Also, if the secondary path changes, the muffing operation will not be stable and cannot be used in a general indoor environment. In this research, we developed an ANC system using multi-channel super-directional speakers to solve these problems. In the proposed system, we suppressed the increase in sound pressure at uncontrolled points by taking advantage of the characteristics of the speaker. In addition, by constructing a simple secondary path estimation method and an inter-channel sound pressure control method, we clarified that it is possible to achieve stable noise reduction even when the indoor environment changes.

研究分野：適応信号処理

キーワード：アクティブノイズコントローラ パラメトリックスピーカ 多チャンネル制御 二次経路変動

1. 研究開始当初の背景

騒音と同振幅逆位相の制御音を生成し、それらを干渉させることで騒音を消去する信号処理技術にアクティブノイズコントロール(Active Noise Control: 以下 ANC)があり、これまでに様々な構成の手法が提案されている。代表的な構成に Filtered-x 法があり、これに基づく様々なアルゴリズムが提案されている。これらの既存手法の多くは消音制御点において有効な消音量および収束精度が得られているものの、消音制御点以外の非制御地点では騒音と制御音が同位相で干渉し、騒音が増大する問題が生じる。これは音波が全方位へ球面上に拡散する性質を持つことから生じる問題である。また、Filtered-x 法では、制御スピーカから消音制御点までの反射・残響の経路情報を表すインパルス応答(以下、二次経路)を事前に計測する必要があるため、騒音消去の動作中に消音制御点の移動や経路上での障害物の出現などの二次経路が変化する場合では消音動作が不安定もしくは不可能となる。

前者の問題に対しては、超指向性を持つパラメトリックスピーカを応用した手法が数種提案されている。パラメトリックスピーカは、超音波をキャリア波として利用することで直線的な可聴音の音場を形成できるデバイスである。音波は周波数が高いほど直進する性質があり、このスピーカから放出される音波は、超高周波であるためスピーカ前面から直線的に空間を伝搬する。そのため、スピーカの正面方向以外の場所には、放出される音は伝搬しない。従って、このスピーカを用いて ANC の動作が出来れば、騒音の打ち消しが消音制御点でのみ起こり、それ以外の地点では余分な制御音は殆ど到達せず前者の問題が解決出来る。ただし、いずれの手法も後者の問題である動作途中での二次経路変動や、スピーカ特有の音圧不足等の問題は考慮されておらず、一般的な屋内等の環境での安定動作は難しい。

2. 研究の目的

本研究課題では、上記の問題に対して多チャンネルのパラメトリックスピーカを用いた ANC システムの開発を行う。多チャンネルのパラメトリックスピーカから制御音を直線的に消音制御点へ送出し、それらの合成音で騒音を打ち消す。合成音を用いることでチャンネルそれぞれの制御音の音圧は小さく、かつその伝搬は直線的であるため、非制御点への影響を軽減することが可能である。また、二次経路が音波の直進性により簡易な形式でのモデル化が行えることに基づいた、二次経路モデルのリアルタイム生成法の導入や、チャンネル間の音圧制御手法の構築等により、消音点の移動や障害物の発生等で生じる二次経路変動に対して、ロバストな実環境に即したシステムの実現を目指す。

3. 研究の方法

本研究課題では理論導出・解析、シミュレーションに留まらず、DSP により実システムを構築することで実験的な観点からも本手法の評価・検討を行い、実現性の極めて高い手法の構築を行う。具体的には、以下の手法についての研究を行った。

- (1) 二次経路の簡易推定方式の構築
- (2) 多チャンネル構成とチャンネル間音圧制御法の構築

4. 研究成果

本研究では以下の成果が得られた。

- (1) 二次経路の簡易推定方式の構築

Filtered-x 法は、事前に取得した二次経路モデルを元に動作しており、動作中に真の二次経路に変動が生じると消音効果が維持できない。消音効果を回復するには二次経路の再取得が必要であるが、これにはシステムの動作停止が必要となり消音の継続が困難である。一般的なスピーカを用いた場合の二次経路は、壁面などからの音の反射の影響により、低次から高次反射にかけ比較的大きな値で構成されるため、わずかな環境変化に対しても数値が大きく変動する。そのため、消音動作を継続しつつ二次経路を再推定することは簡単でない。一方、パラメトリックスピーカを用いた場合の二次経路は、音波の直進性から反射の影響が限りなく小さくほぼ直接音の

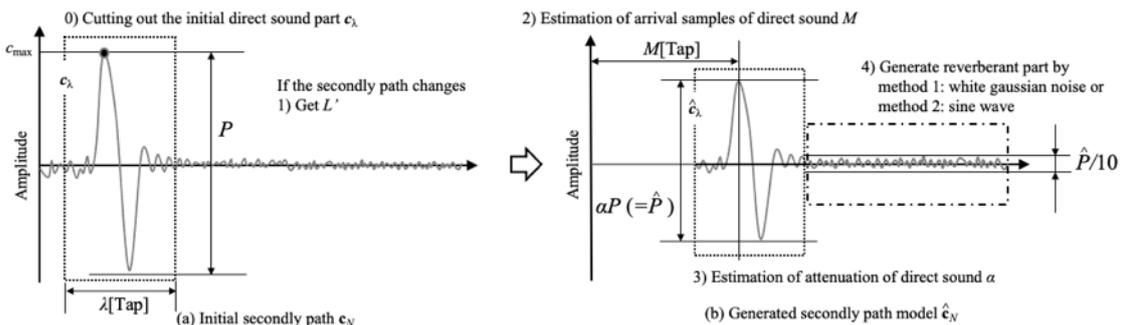


図1 二次経路モデルの生成手順

みで構成される。本手法ではこの特徴を利用して、スピーカと消音制御点間の距離情報のみから、直接音のタップ位置およびその減衰量を推定し、簡易的な二次経路モデルの生成法を構築した<sup>①</sup>。図1に本手法における二次経路モデルの生成手順を示す。まず初期二次経路の直接音部  $c_2$  を切り出し、次に移動距離により算出したタップ位置  $M$  及び減衰量  $\alpha$  に基づき、 $c_2$  を生成モデル上に配置する。最後にそれ以外の残響音部を直接音部の 1/10 のパワーとなる白色雑音(提案手法 1) または正弦波(提案手法 2)により発生させ、二次経路モデルを生成する。図2に生成モデルの例を示す。図2より、本手法の経路モデルと同距離の実測経路を比較すると、概形の特徴をうまくとらえていることが分かる。この時の真値との係数誤差は-3[dB]程で、また二次経路変動によって生じる係数誤差は最大-13[dB]程に達することとなり、本手法の有効性が分かる。

また、本手法により生成された二次経路モデルを用いて消音精度の比較を行った。図3に正弦波を騒音とした際の各周波数に対する消音精度の変化を示す。図3より、二次経路変動前(before)では、周波数の値によらず-25[dB]程度の消音精度を示しているが、二次経路変動後(after)では800[Hz]周辺から精度が徐々に低下していることが分かる。これは生成した二次経路と真のそれとのモデル化誤差が原因であると考えられる。生成モデルの精度向上により消音精度の改善は可能だが、消音対象の騒音の殆どは低周波のパワーが大きく、その抑圧により十分な消音効果が得られる。そのため、800[Hz]未満の抑圧が可能な本手法は十分有効である。その他にも生成した二次経路モデルを用いたシミュレーション及び実環境での様々な消音実験を行っており、それらの結果から、二次経路変動に対しても安定した消音量を確保出来ることを明らかにしている。本研究成果により、二次経路変動に対して二次経路モデルのオンライン再設定が可能となりシームレスな消音動作が実現できる。

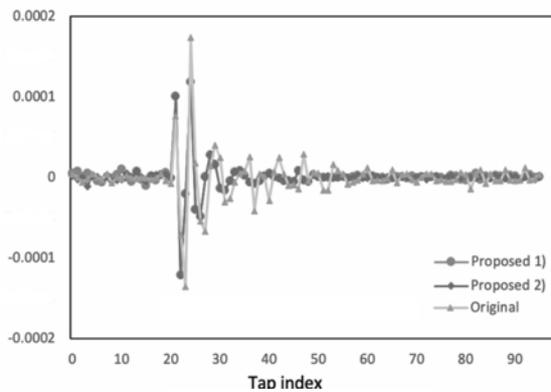


図2 生成モデル例

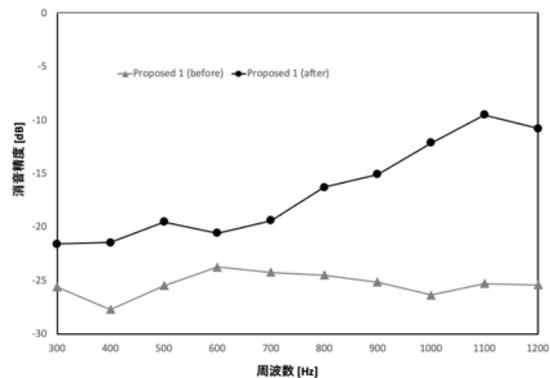


図3 周波数変化に対する消音精度

## (2)多チャンネル構成とチャンネル間音圧制御法の構築

図4に提案した多チャンネルシステム(4ch.)の構成を示す。パラメトリックスピーカによる制御音源をマルチチャンネル化することで制御音の音圧を向上させる<sup>②</sup>とともに、二次経路上の遮蔽物(人や物の移動)による制御音の遮断についてもチャンネル間の音圧制御により回避が可能<sup>③</sup>となる。遮蔽物の検知を行うために、本構成では消音点センサに4チャンネル正四面体プローブを用いた。このマイクロホン4チャンネルのマイクセンサにより構成されており、1つのチャンネルをエラー計測に用い、他のチャンネルをそれぞれ各制御スピーカの音圧計測用として用いる。システムを稼

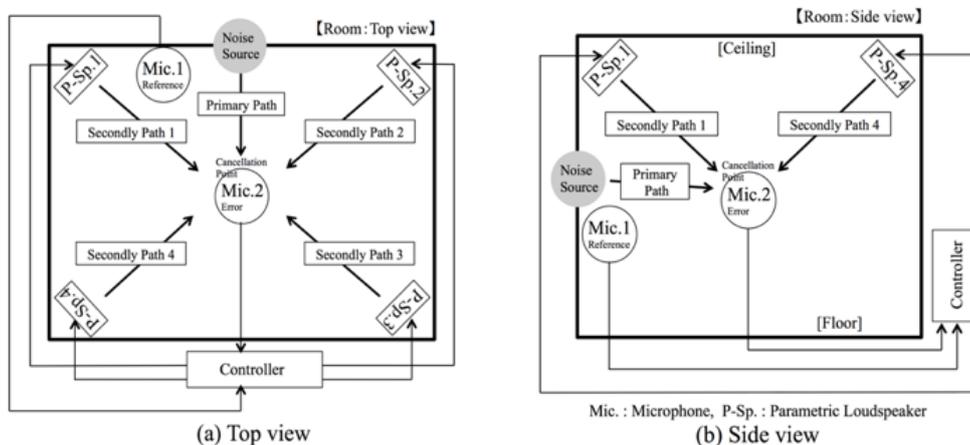


図4: 多チャンネルシステムの構成 (4ch)

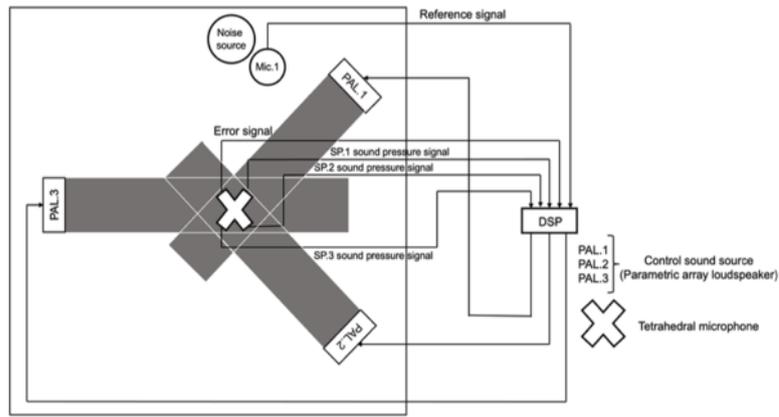


図 5: 実験に用いたチャンネル間音圧制御システムの構成 (3ch)

働した際、任意チャンネルの制御スピーカの二次経路上に遮蔽物が現れた場合、そのチャンネルの制御スピーカの音圧を測定しているマイクの音圧が減衰する。この減衰を検知し、他のチャンネルのスピーカにより不足する音圧のカバーを行うことで、消音効果の低下を抑制する。実験で用いた本システム(3ch.)の構成を図 5 に示す。消音制御点の 4 チャンネル正四面体プローブより、各チャンネルの音圧を逐次取得し、それらの音圧レベルの移動平均値が設定した閾値を下回った場合にそのチャンネルの二次経路に遮蔽物が出現したと判定する。その後、音圧の減衰レベルに応じて該当チャンネル以外のスピーカの音圧を上昇させ、合成制御音の音圧レベルを確保し、消音性能を維持する。表 1 に各チャンネルへ遮蔽物を配置した場合の消音実験の結果を示す。騒音信号は、400[Hz]及び 800[Hz]の正弦波である。表 1 より、二次経路上に遮蔽物が存在しても、遮蔽物が無い場合と同等の消音効果が得られていることが分かる。ただし、PAL.1 に遮蔽物が生じた場合は消音性能がやや低い。これはスピーカの位置が他のスピーカと比べて騒音源に近いため、スピーカ単体の音圧を計測することが出来ず、正常にチャンネル間音圧制御が動作しなかったためだと考えられる。

表 1: 消音実験結果(上段: 正弦波 400[Hz], 下段: 正弦波 800[Hz])

|           | 通常時 [dB] | ANC-OFF [dB]<br>(騒音のみ) | ANC-ON [dB] | 消音量[dB] |
|-----------|----------|------------------------|-------------|---------|
| 遮蔽物無し     | 49.5     | 81.0                   | 67.9        | 13.1    |
|           |          |                        | 69.9        | 9.5     |
| PAL. 1 遮蔽 | 49.5     | 79.4                   | 71.3        | 9.7     |
|           |          |                        | 75.5        | 3.9     |
| PAL. 2 遮蔽 | 49.5     | 79.4                   | 68.8        | 12.2    |
|           |          |                        | 70.1        | 9.3     |
| PAL. 3 遮蔽 | 49.5     | 79.4                   | 68.1        | 12.9    |
|           |          |                        | 70.2        | 9.2     |

本研究成果により、多チャンネルの合成制御音による音圧不足の解消、チャンネル毎の音圧を適応的に制御することによる二次経路上での遮蔽物の影響の回避を可能とした。

本研究課題では上記により、ANC システムの問題点である非制御点での騒音増大及び二次経路変動に伴う消音効果の不安定性を効果的に解決した。実用化には幾つかの解決すべき項目が残るものの、使用環境の制約が少ない一般性を持つ騒音除去システムを実現した。今後も実用化に向けて、残された改善項目を中心に研究を進める予定である。

<引用文献>

- ① 木許雅則, 山口一歩, 大高盛司, “室内環境の変動に対してロバストな超指向性スピーカを用いた能動騒音制御”, 電気設備学会論文誌, Vol.43, No.4, pp.41-49, 2023 年 5 月
- ② 山口一歩, 木許雅則, “複数のパラメトリックスピーカを制御音源に用いた ANC システム”, 2022 年電気学会電子・情報・システム部門大会講演論文集, pp. 1403-1404, 2022 年 8 月
- ③ K. Yamaguchi, M. Kimoto, ”ANC System with Multiple Parametric Array Loudspeakers for Stable Noise Reduction Against Obstacles”, The 2023 RISP International Workshop on Nonlinear Circuits, Communications and Signal Processing (NCSP'23) , pp. 218-221, Mar. 2023

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

|   |                     |
|---|---------------------|
| 1. 著者名<br>木許雅則, 山口一歩, 大高盛司                          | 4. 巻<br>43-4        |
| 2. 論文標題<br>室内環境の変動に対してロバストな超指向性スピーカを用いた能動騒音制御       | 5. 発行年<br>2023年     |
| 3. 雑誌名<br>電気設備学会論文誌                                 | 6. 最初と最後の頁<br>41-49 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.14936/tieiej.43.4_41 | 査読の有無<br>有          |
| オープンアクセス<br>オープンアクセスとしている(また、その予定である)               | 国際共著<br>-           |

〔学会発表〕 計8件（うち招待講演 0件/うち国際学会 1件）

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>大高盛司, 山口一歩, 木許雅則              |
| 2. 発表標題<br>パラメトリックスピーカを用いたマルチチャネルANCシステム |
| 3. 学会等名<br>2021年度 電気学会 電子・情報・システム部門大会    |
| 4. 発表年<br>2021年                          |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>安岡一晟, 木許雅則                         |
| 2. 発表標題<br>インパルスノイズの混入に対してロバストな適応アルゴリズムに関する研究 |
| 3. 学会等名<br>2021年度 電気学会 電子・情報・システム部門大会         |
| 4. 発表年<br>2021年                               |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>山口一歩, 大高盛司, 木許雅則                |
| 2. 発表標題<br>消音点の移動に追従可能な超指向性スピーカを用いたANCシステム |
| 3. 学会等名<br>第24回電気学会東京支部埼玉支所研究発表会           |
| 4. 発表年<br>2021年                            |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>山口一歩, 木許雅則                       |
| 2. 発表標題<br>複数のパラメトリックスピーカを制御音源に用いた ANC システム |
| 3. 学会等名<br>2022年電気学会電子・情報・システム部門大会          |
| 4. 発表年<br>2022年                             |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>安岡一晟, 木許雅則                          |
| 2. 発表標題<br>インパルスノイズの混入に対する分散値可変型 RLS アルゴリズムの提案 |
| 3. 学会等名<br>2022年電気学会電子・情報・システム部門大会             |
| 4. 発表年<br>2022年                                |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>山口一歩, 木許雅則                     |
| 2. 発表標題<br>パラメトリックスピーカの二次経路特性を利用したANCシステム |
| 3. 学会等名<br>2022年日本音響学会秋季研究発表会             |
| 4. 発表年<br>2022年                           |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>山口一歩, 木許雅則                        |
| 2. 発表標題<br>モデル化誤差を考慮したパラメトリックスピーカを用いたANCシステム |
| 3. 学会等名<br>第26回電気学会東京支部埼玉支所研究発表会             |
| 4. 発表年<br>2023年                              |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>Kazuho Yamaguchi, Masanori Kimoto   |
| 2. 発表標題<br>ANC System with Multiple Parametric Array Loudspeakers for Stable Noise Reduction Against Obstacles                       |
| 3. 学会等名<br>The 2023 RISP International Workshop on Nonlinear Circuits, Communications and Signal Processing (NCSP'23) 218-221 (国際学会) |
| 4. 発表年<br>2023年  |

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

| 氏名<br>(ローマ字氏名)<br>(研究者番号) | 所属研究機関・部局・職<br>(機関番号) | 備考 |
|---------------------------|-----------------------|----|
|---------------------------|-----------------------|----|

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

| 共同研究相手国 | 相手方研究機関 |
|---------|---------|
|---------|---------|