

平成 30 年 6 月 13 日現在

機関番号：34416

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K00256

研究課題名(和文) 高騒音環境におけるサイレントスポット生成技術

研究課題名(英文) Silent Spot Generation Technique Under Loud Noise Environments

研究代表者

梶川 嘉延 (Kajikawa, Yoshinobu)

関西大学・システム理工学部・教授

研究者番号：30268312

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：本研究課題では工場など非常に大きな騒音が発生する環境下において、ユーザに快適な音環境を提供するサイレントスポット生成技術の開発を目的とした。そこで、快適な音環境が求められる空間にサイレントスポットを生成することにより、ユーザがいつでも耳を休めることができる環境を提供することが本研究課題の大きな目標である。このような研究目標を実現するために、パラメトリックスピーカを用いたスポット外での音の増音を防ぐシステムの開発、作業環境に物理的障害となるセンサなどを配置せずに済むバーチャルセンシング技術の開発を行い、実験を通じてその有効性を実証した。

研究成果の概要(英文)：The main purpose of this project is to develop a silent spot generation system, which realizes comfortable sound environment for users who stay under terrible loud acoustic noise environment like inside factory. To do this, the silent spot generation system creates comfortable sound environment for users who can acoustically take a rest. In order to realize this system, we have developed silent spot generation systems using parametric array loudspeakers, which have super directivity feature and deliver sound to a limited area, and using virtual sensing technique, which allows error microphones to locate at an appropriate position where does not avoid user's convenience for their works and activities. The effectiveness of the developed systems has been demonstrated through some simulation and experimental results.

研究分野：音響信号処理

キーワード：アクティブノイズコントロール サイレントスポット生成システム 騒音制御 バーチャルセンシング
パラメトリックスピーカ 快適な音環境

1. 研究開始当初の背景

(1) さまざまな工場においては従来から騒音が大きな問題として取り上げられてきたが、いまだ完全な解決策は見出されていなかった。従来の騒音対策は遮音壁などで騒音を発生する機械装置を取り囲んだり、壁などに吸音材を貼り付けたり、さらには耳栓などを作業者に装着を依頼するなど受動的な対策がほとんどであった。このような騒音対策でも一定の効果は期待できるが音圧レベルで数 dB 程度の低減というのが実状であり、また、作業者は作業を円滑に行うという理由のため耳栓の着用を義務付けても装着しないのが現状であった。

(2) 一方、近年ではノイズキャンセリングヘッドホンという名で世間にも知られるようになったアクティブ騒音制御の技術も導入が試みられてきたが、いまだヘッドホンや自動車内など限定された応用でしか実用化されていない。特に工場内のような騒音源が無数に存在し、かつ閉ざされた空間でさまざまな方向から騒音が到来するような環境では従来のアクティブ騒音制御では対処することが極めて困難であった。

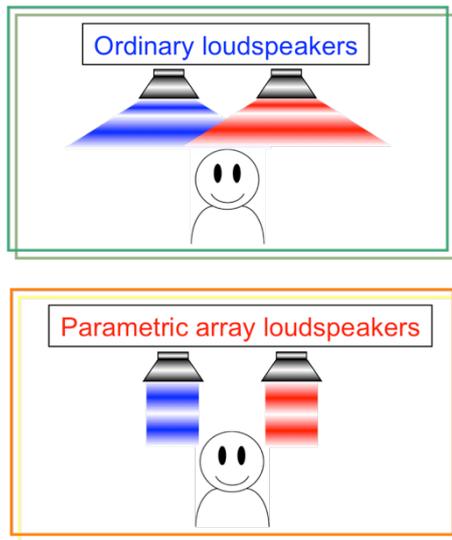


図1 通常のスピーカーと PAL の違い

(3) また、従来のアクティブ騒音制御技術で問題となるのは制御対象となる位置では騒音は低減されるが、その他の場所では逆に騒音が増音する（スピルオーバーと呼ぶ）ということがある。特に工場内では複数の作業者が様々な位置で作業を行っているため、アクティブ騒音制御によるスピルオーバーは避ける事が必須であるといえる。スピルオーバーが起きる原因は騒音制御に用いるスピーカーの特性に起因している。図1の上図のように通常のスピーカーでは音波はあらゆる方向に放射されるため例えば図中の人の頭の周辺を制御しようと思っても、その他の場所にも制御音が伝搬するため、位相が同相となるような地点では騒音は2倍に増音してしまう。さらに、

従来のアクティブ騒音制御では制御対象位置近傍にマイクロホンやスピーカを配置する必要があるため、図1のような工場内では作業者の作業の妨げになってしまう。

2. 研究の目的

(1) 以上のような問題点を踏まえ、本研究課題では音の休憩スポット（サイレントスポット）を高騒音下の任意の場所に生成するとともにスピルオーバーも防ぐ技術について検討を進めた。キーテクノロジーは問題解決に適した性能を有するパラメトリックアレイスピーカ(PAL)とバーチャルセンシング技術である。

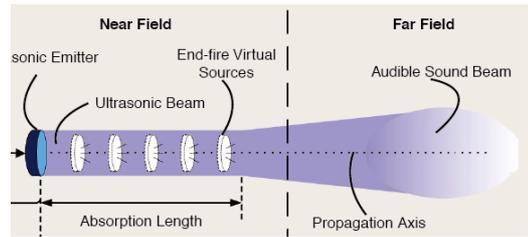


図2 PALの放射原理

(2) PAL は図2に示すように超音波エミッタを通じて可聴音を変調した超音波を放射し、空気の非線形性により可聴音を自己復調することで可聴音を再生するスピーカであり、近年、オーディオスポットの生成などで注目を集めている。その大きな特徴は鋭い指向性を有するという点である。したがって、図1に示すように PAL を制御用スピーカに用いることにより騒音制御対象の位置のみで消音を実現しながら、スピルオーバーを防ぐことが可能となる。

(3) さらに、物理的なマイクロホンなどを作業員付近に置くことなく作業員近傍にサイレントスポットを作成するためにバーチャルセンシング技術を利用する。バーチャルセンシング技術は実際のマイクロホンは天井や床面などに設置しながら、所望のスポットに仮想的なマイクロホンを設置するような技術である。

3. 研究の方法

(1) 本研究課題においては、主に以下の3点について研究を行った。

- ・パラメトリックアレイスピーカによるサイレントスポット生成技術の検討
- ・物理マイクロホンとの距離が離れた場合におけるバーチャルセンシング技術の開発
- ・上記技術の高速デジタルハードウェアへの実装と実現

(2) 工場内ではスピーカやマイクロホンの設置位置が限定されるためバーチャルセンシング技術が必須となる。しかしながら、従来のバーチャルセンシング技術は物理マイクロホンからせいぜい数センチ程度離れた位置でし

か実現できていないため、本研究課題を達成するには新たなバーチャルセンシング技術の検討と実装が急務である。そこで以下の2段階の手順を踏んで検討した。(a)複数の物理マイクロホンを利用した場合にどの程度の距離まで既存のバーチャルセンシング技術が適用可能かどうか性能限界を明らかにする。(b)それを踏まえて新たなバーチャルセンシングとして空間音響伝搬予測を利用した技術に関して実験を通じて適用可能性を明らかにする。(a)では既存のいくつかのバーチャルセンシング技術について実際の実験を通じてその性能限界を明らかにするとともに、なにがボトルネックになっているかを明確化することで新たなバーチャルセンシング技術の開発を検討した。その一候補として空間音響伝搬予測を利用する方法について検討を行い、その消音効果について検証した。具体的には、物理マイクロホンをどのくらいの数、どのような位置に配置すべきかをフィールド実験を通じて検討した。

(3) また、PALのサイレントスポット生成技術への適用可能性を見出すために、さまざまな実装実験を試みた。実験においては最適配置の検討、音圧レベルの検討、PALの最適数の検討などを主に行った。PALを用いてまずはサイレントスポット内にマイクロホンを設置して、サイレントスポットを生成できるかどうかを実験を通じて検討した。

4. 研究成果

(1) まずバーチャルセンシング技術の導入による成果について紹介する。

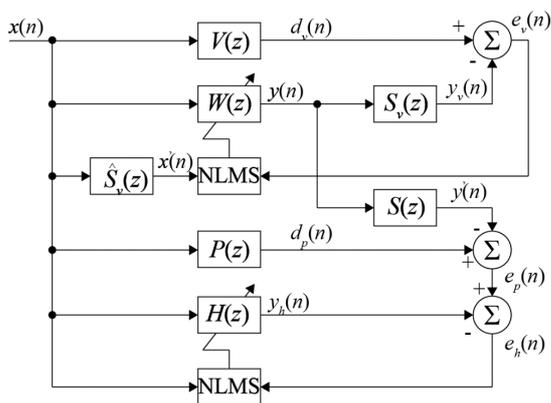


図3 チューニングステージ

バーチャルセンシングを用いたフィードフォワードANCシステムのブロック図を図3および4に示す。図においてPは参照マイクロホンから誤差マイクロホン、Vは参照マイクロホンからバーチャルマイクロホンまでの一次経路をそれぞれ表し、Sは二次音源から誤差マイクロホン、S_vは二次音源からバーチャルマイクロホンまでの二次経路をそれぞれ表している。本システムは、2つのステージによって所望の位置における騒音低減を実現する。チューニングステージでは、バーチャルマイ

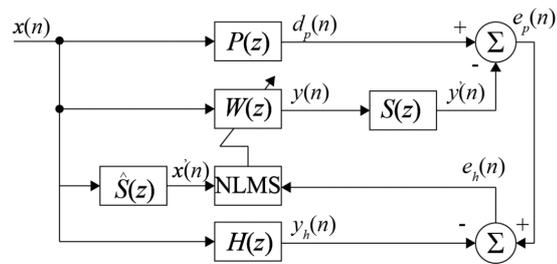


図4 コントロールステージ

クロホン地点での低減効果を最大にするための最適な騒音制御フィルタWの情報を補助フィルタHに保持するように制御が行われる。一方、コントロールステージでは所望の位置に物理マイクロホンが設置されないために、所望の位置での誤差信号を用いることができない。そこで、誤差マイクロホンで得られた誤差信号を補助フィルタからの出力により補正した信号に基づき、騒音制御フィルタを制御する。

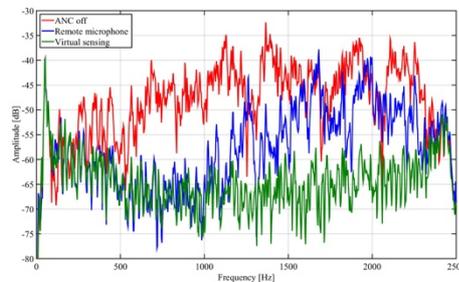
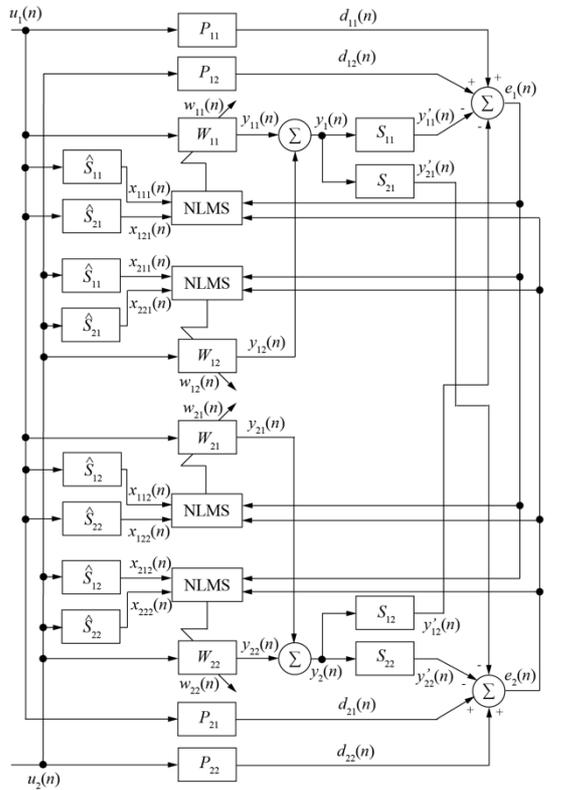


図5 バーチャルセンシングによる結果

(2) 実験結果として、従来方式のバーチャルセンシング(リモートセンシング技術と呼ぶ)を用いた場合、本課題において開発したバーチャルセンシング技術を用いた場合、それぞれにおける所望地点における誤差信号の振幅スペクトルを図5に示す。なお、比較のために制御前の状態も示している。図5より、リモートセンシング技術を利用した場合は騒音低減できていない帯域が存在するのに対して、提案した方式では全帯域にわたって高い騒音低減効果を示されていることがわかる。以上により、本研究課題において開発したバーチャルセンシング技術が有効であり、物理的なマイクロホンを設置することなく、所望地点にサイレントスポットが生成されることがわかった。

(3) 次にパラメトリックスピーカ(PAL)によるシステムについて紹介する。PALを利用することにより、マルチチャネルシステムにおけるクロストークの影響が低減されることをメインにここでは成果を紹介する。2つの参照マイクロホン、2つの二次音源、2つの誤差マイクロホンを用いて制御を行うマルチチャネルANCシステムのブロック図を図6に示す。この図からもわかるように、2つの制御点を2つの二次音源から放射された擬似騒音

を用いて同時に制御を行うため、シングルチャネル ANC システムよりも演算量は必要になるが、両耳同時制御による消音効果を体感しやすくなる。また、二次音源に PAL を使用することで、その超指向性によりクロストーク成分を無視でき、クロストーク二次経路モデルを除去できるため、演算量の削減が期待できる。



$P_{11}, P_{12}, P_{21}, P_{22}$: Primary path $S_{11}, S_{12}, S_{21}, S_{22}$: Secondary path
 $\hat{S}_{11}, \hat{S}_{12}, \hat{S}_{21}, \hat{S}_{22}$: Secondary path model $W_{11}, W_{12}, W_{21}, W_{22}$: Noise control filter

図 6 2x2x2 マルチチャネルシステム

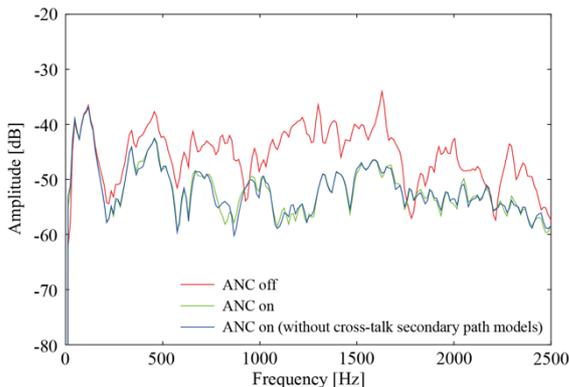


図 7 PAL を利用することに効果の比較

(4) 測定結果として、通常的方式で実装した場合とクロストーク二次経路モデルを除去して実装した場合の誤差マイクロホン地点における誤差スペクトルの比較を図 7 に示す。図より、PAL を利用することでクロストーク二次経路を省略して演算量を低減しても誤差マイクロホン地点において安定に動作し、同等の騒音低減効果が得られていることがわかる。以上より、PAL により演算量の削減が実現さ

れることが実証された。また、紙面都合上ここでは示していないが、PAL の利用によりスピールオーバーを大きく改善できることも実証済みである。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 4 件)

1. 寺内清訓, 本仲君子, 梶川嘉延, 三好誠司, “能動騒音制御の適応速度とその評価尺度に関する統計学的解析,” 電気学会論文誌 C, vol. 138, no. 4, pp. 369–374, Apr. 2018. 査読あり
doi: 10.1541/ieejeiss.138.369
2. 邨田朋生, 梶川嘉延, 三好誠司, “マルチチャネル型能動騒音制御の統計学的解析,” システム制御情報学会論文誌, vol. 30, no. 5, pp. 184–190, May 2018. 査読あり
3. N. Ishibushi, Y. Kajikawa, S. Miyoshi, “Statistical-Mechanical Analysis of LMS Algorithm for Time-Varying Unknown System,” Journal of the Physical Society of Japan, vol. 86, no. 2, 024803, 2017. 査読あり
doi.org/10.7566/JPSJ.86.024803
4. K. Tanaka, C. Shi, Y. Kajikawa, “Binaural Active Noise Control Using Parametric Array Loudspeakers,” Applied Acoustics, vol. 116, pp. 170–176, Jan. 2017. 査読あり
doi: 10.1016/j.apacoust.2016.09.021

[学会発表] (計 3 2 件)

1. 三宅拓実, 岩居健太, 梶川嘉延, “ヘッドマウント型フィードフォワード ANC システムに関する検討 ~ Case(2, 1, 1) ANC システムに拡張した場合の騒音低減効果について ~,” 電子情報通信学会信号処理研究会, 2018.
2. 枝元祥馬, 梶川嘉延, “バーチャルセンシングを用いたフィードフォワード ANC システムの実装における有効性の検証,” 電子情報通信学会信号処理研究会, 2018.
3. S. Hirose, Y. Kajikawa, “Effectiveness of Headrest ANC System with Virtual Sensing Technique for Factory Noise,” Asia-Pacific Signal and Information Processing Association 2017 Annual Summit and Conference (APSIPA ASC 2017), 2017.
4. 枝元祥馬, 梶川嘉延, “広帯域騒音の低減を目的とするバーチャルセンシングを用いたフィードフォワード ANC システム,” 第 3 2 回信号処理シンポジウム, 2017.
5. 長谷川礼奈, 梶川嘉延, “ヘッドレスト ANC におけるマルチチャネルバーチャルセンシングの検討,” 日本音響学会 2017

- 年秋季研究発表会, 2017.
6. 広瀬舜, 梶川嘉延, “ヘッドレスト ANC システムの工場騒音への有効性に対する検討,” 日本音響学会 2017 年秋季研究発表会, 2017.
 7. 枝元祥馬, 梶川嘉延, “工場内騒音の低減を目的としたヘッドレスト型フィードフォワード ANC システム,” 日本音響学会 2017 年秋季研究発表会, 2017.
 8. 三宅拓実, 梶川嘉延, “工場内騒音の低減を目的としたヘッドマウント型 ANC システムに関する検討,” 日本音響学会 2017 年秋季研究発表会, 2017.
 9. R. Hasegawa, Y. Kajikawa, C.-Y. Chang, S. M. Kuo, “Headrest Application of Multi-Channel Feedback Active Noise Control with Virtual Sensing Technique,” *Internoise 2017*, 2017.
 10. 長谷川礼奈, 梶川嘉延, 張政元, 郭森林, “ヘッドレスト ANC のためのバーチャルセンシングの検討,” 電子情報通信学会信号処理研究会, 2017.
 11. 広瀬舜, 梶川嘉延, “工場内騒音におけるバーチャルセンシングを用いたヘッドレスト ANC システムの有効性に関する検討,” 電子情報通信学会信号処理研究会, 2017.
 12. 枝元祥馬, 史創, 梶川嘉延, “ヘッドレスト ANC システムの実現に向けた検討,” 電子情報通信学会信号処理研究会, 2017.
 13. 三宅拓実, 梶川嘉延, “シフト演算を用いた NLMS アルゴリズムに関する検討,” 電子情報通信学会信号処理研究会, 2017.
 14. H. Sawano, Y. Kajikawa, “Active Noise Control Systems with Simplified Period Aware Linear Prediction Method for MR Noise,” *Asia-Pacific Signal and Information Processing Association 2016 Annual Summit and Conference (APSIPA ASC 2016)*, 2016.
 15. T. Shimizu, Y. Kajikawa, “Online Secondary-Path-Modeling ANC System with Simultaneous Perturbation Method,” *Asia-Pacific Signal and Information Processing Association 2016 Annual Summit and Conference (APSIPA ASC 2016)*, 2016.
 16. 原田拓実, 梶川嘉延, “フィードフォワード ANC システムのための NLMS アルゴリズムの FPGA への実装法,” 第 31 回信号処理シンポジウム, 2016.
 17. 枝元祥馬, 梶川嘉延, “バーチャルセンシングを用いたフィードフォワード ANC システムにおける経路追従性に関する検討,” 第 31 回信号処理シンポジウム, 2016.
 18. S. Edamoto, C. Shi, Y. Kajikawa, “Virtual Sensing Technique for Feedforward Active Noise Control,” 5th Joint Meeting of the Acoustical Society of America and Acoustical Society of Japan, 2016.
 19. T. Harada, Y. Kajikawa, M. Nishimura, “FPGA Implementation for Feedforward Active Noise Control with Oversampling Technique,” 2016 International Workshop on Smart Info-Media Systems in Asia (SISA2016), 2016.
 20. S. Edamoto, C. Shi, Y. Kajikawa, “Directional Feedforward ANC System with Virtual Sensing Technique,” 2016 International Workshop on Smart Info-Media Systems in Asia (SISA2016), 2016.
 21. 原田拓実, 梶川嘉延, 西村正治, “FPGA を用いたフィードフォワード ANC システムに関する検討,” 電子情報通信学会信号処理研究会, 2016.
 22. 長谷論, 梶川嘉延, Cheng-Yuan Chang, Sen M. Kuo, “保育器に対するフィードフォワード ANC システムに関する検討,” 電子情報通信学会信号処理研究会, 2016.
 23. 木下哲, Antonius Siswanto, Cheng-Yuan Chang, Sen M. Kuo, 梶川嘉延, “バーチャルマイクロホンを用いたヘッドレスト CICO ANC システムの有効性に関する検討,” 電子情報通信学会信号処理研究会, 2016.
 24. 枝元祥馬, 史創, 梶川嘉延, “バーチャルセンシングを用いたフィードフォワード ANC システムに関する検討,” 電子情報通信学会信号処理研究会, 2016.
 25. 澤野衡, 梶川嘉延, “MRI 騒音の周期性に着目したフィードバックアクティブノイズコントロール,” 電子情報通信学会信号処理研究会, 2016.
 26. 木下 哲, 梶川 嘉延, 三好 哲, “BEAT を用いた枕型 ANC システムの MR 騒音に対する有効性の検討,” 日本音響学会 2016 年春季研究発表会, 2016.
 27. S. Kinoshita, Y. Kajikawa, “Multi-channel Feedforward ANC System Combined with Noise Source Separation,” *Asia-Pacific Signal and Information Processing Association 2015 Annual Summit and Conference (APSIPA ASC 2015)*, 2015.
 28. 木下哲, 梶川嘉延, “一般化サイドローブキャンセラによる騒音源分離を利用したマルチチャネルフィードフォワード ANC システムに関する検討,” 第 30 回信号処理シンポジウム, 2015.
 29. 清水貴大, 梶川嘉延, “摂動法を利用したオンライン二次経路同定 ANC システムに関する検討,” 電子情報通信学会信号処理研究会, 2015.
 30. T. Hase, Y. Kajikawa, “Multi-channel ANC System Using Optimized Reference Microphones Based on Time Difference

of Arrival,” 23rd European Signal Processing Conference (EUSIPCO2015), 2015.

31. 長谷諭, 梶川嘉延, “多方向からの騒音到来に対する ANC システムに関する研究”, 第 59 回システム制御情報学会研究発表講演会, 2015.
32. 木下 哲, 梶川嘉延, “マイクロホンアレイによる騒音源分離を利用したマルチチャンネルフィードフォワード ANC システムに関する検討,” 電子情報通信学会信号処理研究会, 2015.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

梶川 嘉延 (KAJIKAWA, Yoshinobu)
関西大学システム理工学部・教授
研究者番号 : 30268312

(2) 研究分担者

()

研究者番号 :

(3) 連携研究者

()

研究者番号 :

(4) 研究協力者

史 創 (SHI Chuang)
電子科技大学 (中国)・准教授