

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 29 日現在

機関番号：22604

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2011～2013

課題番号：23656165

研究課題名(和文)伸縮および操舵可能な超指向性音源の開発と移動静粛空間の生成

研究課題名(英文)Development of an extensible and steerable parametric array loudspeaker and the generation of a moving quiet space

研究代表者

田中 信雄(Tanaka, Nobuo)

首都大学東京・システムデザイン研究科・名誉教授

研究者番号：70305423

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円、(間接経費) 900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、超指向性音源PALの持つ放射音超指向特性に、操舵機能およびビーム長の調整機能を付与させることにより、所望の箇所のみサウンドビームを自在に操ることの出来るメカニズムを開発するを目的としている。まず、異なる2つの周波数を持つ超音波ビームを別の角度にステアリングすることにより、2つのビームが重なる領域の角度と長さを調整できることを示す。次いで、当該領域にのみ可聴音である差音が再生されることを実験的に明らかにする。さらに、オールパスフィルタの係数を調整することにより、サウンドビームのステアリングをなめらかに行う手法を提案する。

研究成果の概要(英文)：The objective of this study is to develop an extensible and steerable parametric array loudspeaker which enables to manipulate both of the direction and length of audible sound beam. First, it is clarified that by steering two ultrasound beams with different frequencies to different directions, direction and length of the region where the two beams are overlapped can be modified. Next, it is experimentally demonstrated that audible sound is produced in the region where the two frequencies exists. Finally, by adjusting a coefficient of an all pass filter, the method for smoothly manipulating the audible sound beam.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学，機械力学・制御

キーワード：能動騒音制御 パラメトリックスピーカー 波面合成

1. 研究開始当初の背景

静謐性を確保するための手法として ANC(Active Noise Control)が提案されているが、アイデア倒れで世に普及しない理由は、制御音源の音場拡散性にある。すなわち、ある箇所の静粛性を追求すると他所での騒音増大現象がついてまわるからである。この問題を解決する手法のひとつに超指向性音源 PAL(Parametric Array Loudspeaker)の援用がある。PALとは、流体力学的な非線形性を利用することにより、通常のスピーカに比べ極めて高い指向性を獲得したスピーカである。すでに研究代表者らは、これを ANC に応用することでターゲット箇所における静粛性を担保しつつ、他所での騒音悪化を惹起しない手法を提案している。さらに、PALの持つ放射音超指向特性に操舵機能を付与させることにより、所望の箇所にサウンドビームを自在に操ることの出来るメカニズムを開発すると共にその制御システムを構築し、当該手法の有用性を数値解析および実験により明らかにしている。

PALの欠点のひとつは、その高すぎる指向性にある。すなわち、対象点のみを静粛化したとしても、ターゲットの奥に遮へい物が存在すればサウンドビームは反射してしまい、他所に影響を与えてしまう。したがって、比較的狭い閉空間場のような領域においては、PALの有効性は低いのが現状であった。

2. 研究の目的

上記の背景を基に、提案研究では、操舵機能とビーム長の調整機能を有する新しい PAL、すなわち ESPAL(Extendable and Steerable Parametric Array Loudspeaker)の開発を主目的とする。このことにより、周りに障害物がある領域においてターゲットが移動する場合でも、目標のみにサウンドビームを追尾することが可能となり、移動ターゲット周辺に絶えず静粛空間を生成することが可能となる。音は伝搬するという常識を覆し、提案研究 ESPAL は音伝搬の自在な操作を目的とする。これが達成されれば、「陽だまり」ならぬ「音だまり」の生成が可能となりその応用は多岐にわたる。例えば、踏切における警報音への適用である。警告音は踏切を横断する車両や通行人にとっては必須の情報音であっても、近隣住人にとっては騒音以外の何物でもない。踏切の遮断機近傍にのみ「音がたまり」、その音が伝搬しなければ、安全と環境保全を同時に満足できよう。また、同じ部屋に居ながら、ある者にはクラシックを、ある者には落語を、ある者には安息のための独立空間を提供できれば、アメニティと環境保全が両立する。

3. 研究の方法

超音波素子アレイで構成される制御音源を、遅延時間駆動することにより達成される指向性機能は既に研究代表者らによって明らかにされている。超指向性音源 PALの指向

性制御法は既に確立している。提案研究では、この指向性制御法と PALの二周波数駆動法を組み合わせることで、操舵機能に加えて可聴音ビームの長さを制御する手法を提案する。図1に基本原理を示す。図より明らかなように、40kHzと41kHzの超音波ビームが、左右対称の角度で操舵されている。この場合、その差音となる1kHzの可聴音が生成されるのは、超音波ビームが重なり合う三角形の領域のみである。したがって、超音波ビームの指向角度が0度に近づけば、可聴音ビームは長くなり、逆に指向角度が大きくなれば、可聴音ビームは短くなる。この原理と既に確立されている指向性制御を組み合わせることで、指向角度とビーム長を同時に制御することが可能となる。そのイメージを図2に示す。

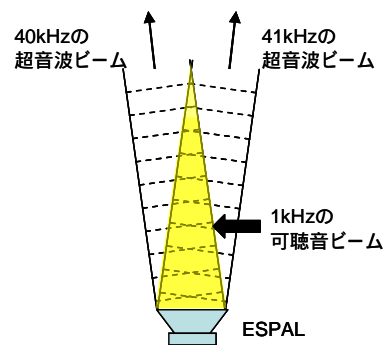


図1 ESPALの基本原理

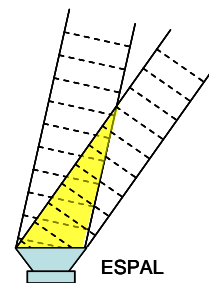


図2 可聴音ビームの指向角度と長さの制御イメージ

4. 研究成果

本研究課題において得られた成果をまとめると以下ようになる。

(1) 研究代表者らが既に確立している可聴音ビームのステアリング技術を基に、可聴音ビームの長さや指向角度の制御法を明らかにした。ビームステアリングとは、一列に等間隔で並べられた音源を一定の遅延時間で駆動することにより特定の方向への指向性をもった音を放射する技術である。

図3～5に実験結果を示す。図3は座標軸の原点に ESPAL を設置し、39.5kHzの超音波ビームを水平方向から +30度ステアリングした結果を示している。同様に、図4は40.1kHzの超音波ビームを水平方向から +30

度ステアリングした結果である。図5はこれら2本の超音波ビームを重ねた際に再生された差音(1kHz)の音圧分布を示している。図より明らかなように、超音波ビームが重なる領域にのみ可聴音が再生されていることが分かる。したがって、この結果より2つの周波数の超音波にそれぞれ遅延時間を与え二方向へビームを放射することにより、それらが重なる領域にのみ可聴音の仮想音源を生成することが可能であることが明らかになった。

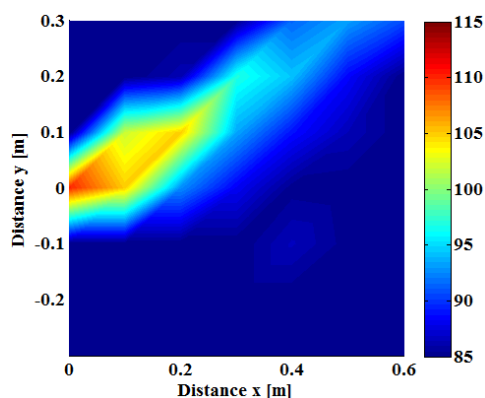


図3 +30度方向にステアリングされた超音波ビームの音圧分布(39.5kHz)

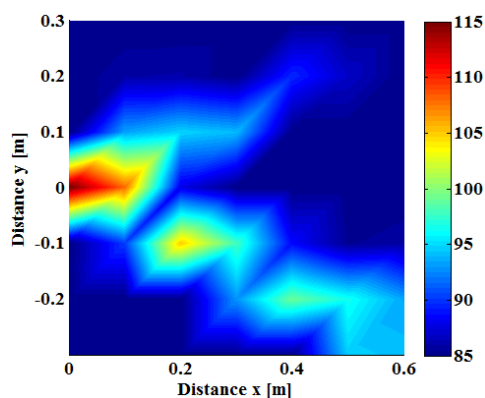


図4 -30度方向にステアリングされた超音波ビームの音圧分布(40.5kHz)

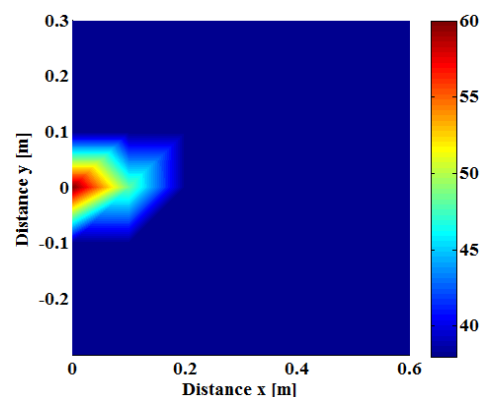


図5 ESPALにより再生された可聴音(1kHz)の音圧分布

(2) 超音波ビームをなめらかにステアリングするためにオールパスフィルタの係数を変化させることで所望の遅延時間を信号に与える手法を明らかにした。以下にその概要を説明する。

オールパスフィルタとはゲインが一定で位相遅れのみを有するフィルタのことである。その伝達関数は以下のように表される。

$$G(s) = \frac{s-a}{s+a} \quad (1)$$

ただし、 a は任意定数である。次に定常状態を仮定し、さらに伝達関数の有理化を行うと、以下ようになる。

$$G(j\omega) = \frac{\omega^2 + 2j\omega a - a^2}{a^2 + \omega^2} \quad (2)$$

ただし、 j は虚数単位、 ω は角周波数を表す。したがって、伝達関数の位相を θ とすると次式が成り立つ。

$$(\omega^2 - a^2) \tan \theta = 2\omega a \quad (3)$$

上式より、伝達関数が安定である必要がある事を考慮すると、任意定数 a が角周波数と位相の関数として以下のように求まる。

$$a = \frac{\omega(-1 - \sqrt{1 + \tan^2 \theta})}{\tan \theta} \quad (4)$$

所望の遅延時間と超音波ビームの角周波数から対応する位相を計算し、上式に代入することで、オールパスフィルタの係数が決定される。また、本研究においてはDSPを用いて信号処理を行うため、式(1)を双一次変換することで、デジタルフィルタ表現が以下のように得られる。

$$G(z^{-1}) = \frac{BB - AAz^{-1}}{AA - BBz^{-1}} \quad (5)$$

ただし、 z^{-1} は時間遅れ要素、 AA および BB は T をサンプリング時間として、以下のように定義される。

$$AA = 1 + \frac{T}{2}a \quad (6)$$

$$BB = 1 - \frac{T}{2}a \quad (7)$$

以上より、式(4)によって計算された適切な a の値を式(6)、(7)に代入することで、超音波ビームのステアリング角度をなめらかに変化させることが可能になる。

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15件)

1. 眞田明, 東山孝治, 田中信雄, 能動制御型防音ボックスに関する研究(参照信号の取得方法について), 日本機械学会論文集C編, 80巻, 2014, pp.3049-3058.

2. 田中信雄, 多嘉良佑介, 岩本宏之, Eigenpairs of a coupled rectangular cavity and its fundamental properties, Journal of the Acoustical Society of America, Vol.131, No.3, 2012, pp.1910-1921.
 3. 石森章純, 田中信雄, 岩本宏之, 遅延駆動パラメトリックスピーカによる広域能動騒音制御, 日本機械学会論文集 C 編, 79 巻, 2013, pp.604-616.
 4. 岩本宏之, 田中信雄, Simon G. Hill, Feedback control of wave propagation in a rectangular panel, part 1: Theoretical investigation of fundamental properties, Mechanical Systems and Signal Processing, Vol.39, 2013, pp.3-19.
 5. 眞田明, 田中信雄, Extension of the frequency range of resonant sound absorbers using two degree of freedom Helmholtz-based resonators with a flexible panel, Applied Acoustics, Vol.74, 2013, pp.509-516.
 6. 平隆志, 田中信雄, 騒音源情報推定による Virtual Sensing ANC, 日本機械学会論文集 C 編, 78 号, 2012, pp.2000-2011.
 7. 眞田明, 東山孝治, 田中信雄, 能動制御型防音ボックスに関する研究(ポイントアクチュエータと圧電フィルムセンサによるアクティブ遮音制御の適用), 日本機械学会論文集 C 編, 79 巻, 2013, pp.3049-3058.
 8. 田中信雄, 振動放射音の連成現象, 日本音響学会, 89 巻, 2013, pp.647-652.
 9. 田中信雄, 音響・構造連成場における固有値問題, 日本機械学会論文集 C 編, Vol.78, 2012, pp.1031-1043.
 10. Simon G. Hill, 田中信雄, 岩本宏之, A generalised approach for active control of structural-interior global noise: Practical implementation, Journal of Sound and Vibration, Vol.331, 2012, pp.3227-3239.
 11. 岩本宏之, 田中信雄, Simon G. Hill, Feedback control of wave propagation in a rectangular panel, part 1: Experimental realization using clustered velocity and displacement feedback, Mechanical Systems and Signal Processing, Vol.32, 2012, pp.216-231.
 12. 岩本宏之, 田中信雄, 多嘉良佑介, Active feedforward wave control of a rectangular panel using a wave filter constructed with smart mode sensors, Journal of System Design and Dynamics, Vol.5, No.6, 2011, pp.1347-1360.
 13. 岩本宏之, 田中信雄, 多嘉良佑介, スマートモードセンサによる波動フィルタを基調とした薄肉矩形平板のフィードフォワード型波動制御, 日本機械学会論文集 C 編, 77 巻 776 号, 2011, pp.1223-1237.
 14. 米山聡, 田中信雄, Smart film actuators using biomass plastic, Smart Materials and Structures, Vol.20, No.4, 2011, Art No.045012.
 15. 田中信雄, 館亮祐, パラメトリックスピーカの反射を用いたアクティブノイズコントロール, 日本機械学会論文集 C 編, 77 巻 775 号, 2011, pp.764-773.
- [学会発表](計 29 件)
1. 田中信雄, 田中基貴, Trivial control for generating a globally quiet space, 20th International Congress on Sound and Vibration (ICSV20), 平成 25 年 07 月 09 日, Bangkok, Kingdom of Thailand
 2. 岩本宏之, 田中信雄, 眞田明, Experiment on the generation of a quiet space in a rectangular cavity using active wave control -updated results-, 20th International Congress on Sound and Vibration (ICSV20), 平成 25 年 07 月 08 日, Bangkok, Kingdom of Thailand
 3. 田中信雄, Local and global active noise control using a parametric array loudspeaker, 166th Meeting of Acoustical Society of America (招待講演), 平成 25 年 12 月 05 日, San Francisco, United States of America
 4. 西郷宗玄, 岩本宏之, Dong-Ho Nam, Wave absorption control of beam based on finite difference approach, Asia-Pacific Vibration Conference 2013 (APVC2013), Jeju, Republic of Korea
 5. 田中信雄, Eigenpairs of a coupled rectangular cavity, The 11th international conference on computational structures technology, 平成 24 年 09 月 04 日, Croatia
 6. 岩本宏之, 田中信雄, 眞田明, Active boundary control of a rectangular cavity, Euronoise 2012, 平成 24 年 6 月 11 日, Prague, Czech Republic
 7. 岩本宏之, 田中信雄, 眞田明, Experiment on the generation of a quiet space in a rectangular cavity using active wave control, 19th International Congress on Sound and Vibration (ICSV19), 平成 24 年 7 月 9 日, Vilnius, Lithuania
 8. 東山孝治, 眞田明, 田中信雄, Acoustic enclosure with active sound transmission control (On the comparison of enclosure size), Inter-noise 2011, 平成 23 年 9 月 5 日, Osaka, Japan
 9. 眞田明, 東山孝治, 田中信雄, Active control of sound transmission through

- a panel using point force actuators and PVDF film sensors,, Inter-noise 2011,平成 23 年 9 月 5 日,Osaka, Japan
10. 田中 信雄, Active control of distributed structures-Toward the realization of a vibration-free state, Asia Pacific Vibration Conference2009 (招待講演),平成 23 年 12 月 6 日,Hong Kong, China
 11. 岩本宏之,田中信雄, Generation of a quiet space in a rectangular cavity using wave-filter-based active wave control, Asia Pacific Vibration Conference2009,平成 23 年 12 月 7 日, Hong Kong, China
 12. 菅野秀,田中信雄,岩本宏之, Sound confinement control of a multiple-wall structure,Asia Pacific Vibration Conference2009,平成 23 年 12 月 7 日,Hong Kong, China

ほか国内学会 17 件

6. 研究組織

(1)研究代表者

田中 信雄 (TANAKA, NOBUO)

首都大学東京・システムデザイン研究科・名誉教授

研究者番号：70305423

(2)研究分担者

岩本 宏之 (IWAMOTO, HIROYUKI)

成蹊大学・理工学部・准教授

研究者番号：90404938