

平成 30 年 6 月 18 日現在

機関番号：33903

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K05879

研究課題名(和文) パラメトリックスピーカーを用いたアクティブ騒音制御

研究課題名(英文) Active noise control using a parametric speaker

研究代表者

古橋 秀夫 (FURUHASHI, Hideo)

愛知工業大学・工学部・教授

研究者番号：40229125

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：パラメトリックスピーカーによる、アクティブ騒音制御について研究を行った。指向性制御可能なパラメトリックスピーカーを開発。シミュレーションも行い、その特性を調べた。パラメトリックスピーカーを用いることにより、通常のスピーカーを用いた場合より制御領域を進行方向に対して長く取れ、また周辺の騒音増大の問題が抑えられた。拡がり角を広くすることにより騒音抑制領域の拡大を試みたが、位相の不整合により期待したほどの領域拡大は得られなかった。モーションセンサーによるパラメトリックスピーカーのヘッドトラッキングシステムを開発し、位相、方位、音圧を制御することにより、広い範囲でアクティブ騒音制御が実現された。

研究成果の概要(英文)：Herein, active noise control using a parametric speaker was investigated. The directivity of the parametric speaker can be controlled electrically. The characteristics of the speaker were also studied via computer simulation. Using the parametric speaker, a long area of noise control can be obtained in the direction of the sound wave. Moreover, the increase of noise level in the surrounding area was suppressed. Expansion of the noise reduction area was attempted by increasing the directivity divergence of the parametric speaker. However, the expected result was not achieved due to phase mismatching of the sound waves. Finally, active noise control with a wide area was successfully realized by developing a head-tracking system for a parametric speaker using a motion sensor and controlling the phase, direction, and sound pressure.

研究分野：波動工学

キーワード：パラメトリックスピーカー アクティブ騒音制御 超音波 ノイズ

### 1. 研究開始当初の背景

アクティブノイズキャンセリング技術は古くから研究が行われており、その有用性は実証済みである。既にこの技術を使ったヘッドフォンは市販されており、広く普及している。一方、広範囲のキャンセリングは、波面形状を騒音と一致させる必要があり、容易ではない。超音波の非線形効果を用いたパラメトリックスピーカーは指向性が狭く、音は狭い範囲にしか広がらない。そのため、局所的にノイズの軽減が可能であり、その周りへの影響を抑えることができる。またその仮想音源位置はパラメトリックスピーカー本体の後方の離れた位置に成り、平面波に近い波面を生成できると考えられる。したがって、サイレン音など遠方からの騒音を有効に消すことができると考えられる。

### 2. 研究の目的

本研究では、指向性制御可能なパラメトリックスピーカーを用いたアクティブノイズキャンセリングシステムの開発を目的としている。特に、遠方からの警報音など平面波に近く一定の周波数の音波のキャンセリングについて研究を行う。フェーズドアレイ制御により指向性(方位、広がり)を制御するとともに、人の位置をモーションセンサーにより検知し、キャンセリングエリアの位置が制御可能なシステムを構築する。

### 3. 研究の方法

本研究は、以下のシステム構成によりその特性を調べた。

(1) FPGAを用いたPDM、PWMアンプAM変調方式パラメトリックスピーカーシステムとそれを用いたアクティブノイズ制御ディジタルアンプ(Dアンプ)はアナログアンプに比べ消費電力を大幅に抑えることができる。PDMアンプにおいては、動作クロック周波数と $\Delta\Sigma$ 変調の次数等をパラメータとして、最適化を行った。PWMアンプにおいては、動作クロック周波数をパラメータとして、差最適化を行った。また、それを用いて単一周波数平面音波のアクティブノイズ制御の基本的特性を調べた。パラメトリックスピーカーからの発生音をKZK方程式によりシミュレーションし、その振幅及び位相を計算。一定音圧の平面音波との重ね合わせにより、アクティブノイズ制御特性について調べた。また、それを実験によっても確かめた。

(2) 電子的に指向性(方位及び広がり角)制御可能なパラメトリックスピーカーとそれを用いたアクティブノイズ制御  
パラメトリックスピーカーの各素子への入力信号の位相を制御することにより、可調音の指向性を制御する。位相はFPGAでリングバッファを用いた。方位制御においては、マイクロフォンアレイによりノイズ音の方位を計測し、特定の位置においてアクティブノイズ制御を行った。広がり角制御においては、

ノイズ制御エリアの拡大について調べた。また、KZK方程式を用いた指向性制御及びアクティブノイズ制御のシミュレーションを行い、実験結果と比較する。

(3) モーションセンサーによるヒューマントラッキング・アクティブノイズ制御システム

モーションセンサー(Microsoft Kinect)により、人の頭部位置を検出。人の移動に合わせて電子方向制御可能なパラメトリックスピーカーからの音はその頭部に向けるシステムを開発した。センサーにより計測した方位、距離からその位置でのアクティブノイズ制御に必要なパラメトリックスピーカーから出される音波の音圧、位相、方位を計算。音圧、位相、方位共に制御した場合、位相と方位のみ制御した場合、方位のみ制御した場合について、アクティブノイズ制御の効果を調べた。

### 4. 研究成果

(1) 最初に、アクティブノイズ制御のために、ノイズの少ないパラメトリックスピーカーを開発した。PDMアンプとPWMアンプを用いたAM変調方式パラメトリックスピーカーシステムを開発。そのノイズ特性を数値シミュレーション及び実験により調べ、ノイズを少なくするための最適な回路パラメータを決定した。PDMよりPWMにおいて良好なノイズ特性を得られた。音響周波数1kHz、動作クロック周波数5MHz、2次 $\Delta\Sigma$ 変調において、50dBのS/N比(高調波を除く)を得ることができた(Fig. 1)。高調波は、変調度を下げることにより、軽減することができる。

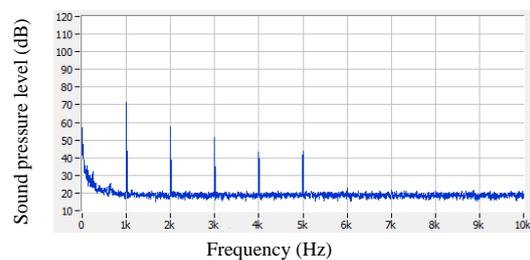


Fig. 1 Acoustic signal spectrum obtained for the 2nd order,  $\Delta\Sigma$  transformations. Acoustic frequency 1 kHz, clock frequency 5 MHz.

次に、パラメトリックスピーカーからの発生音をTransformed Beam Equationを用いたKZK方程式を使用してシミュレートした。パラメトリックスピーカー前面10m以内の領域では、当初の予想通り仮想音源の位置が通常のスピーカーよりも後方と成り、点音源より平面波寄りの波面となることが分かったが、10m以上の領域ではむしろ仮想音源位置が前方に成ることが明らかとなった。

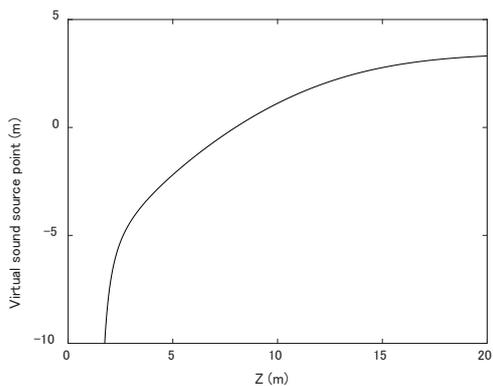
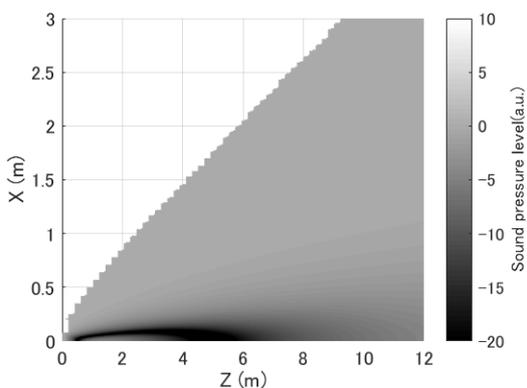
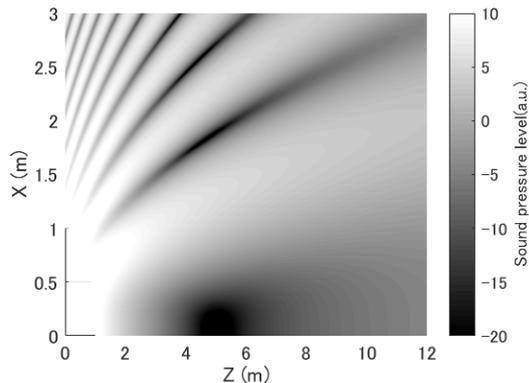


Fig. 2 Calculated virtual point of the sound source of a parametric speaker emitting at 1 kHz.

次に、アクティブノイズ制御のシミュレーションを、パラメトリックスピーカーと通常の点音源スピーカに対して行った。ノイズ源は遠方にあり、一定音圧の平面波を仮定している。ノイズ源からの音波の進行方向と、各スピーカ方向は同じとしている。図は5mの位置でノイズ音とスピーカ音が同じ振幅、逆位相で重なった場合の結果を示す。パラメトリックスピーカーを使用した場合には5m付近で大きなノイズ低減効果がみられ、その周りでは0dBと成っている。一方、通常の点音源スピーカの場合は、5m付近で大きなノイズ低減効果がみられるものの、場所によっては音圧が+10dBを超える。また、パラメトリックスピーカーでは進行方向に長くノイズ低減効果が維持されているが、通常のスピーカでは進行方向に対して2m程度の範囲に限られ、またスピーカ近傍で大きな音圧となる。これは、パラメトリックスピーカーにおいては仮想点音源位置がスピーカより後方に成ることによるものである。



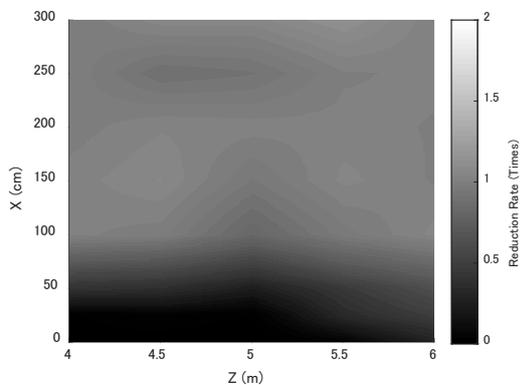
(a) Parametric speaker



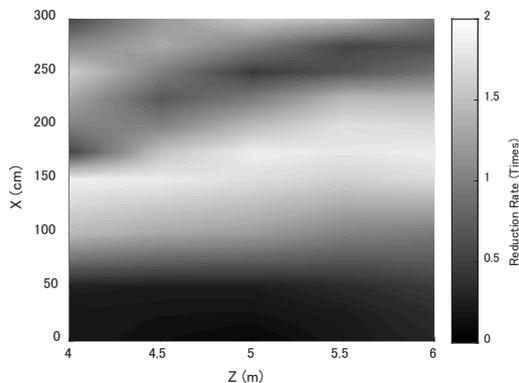
(b) Ordinary speaker

Fig. 3 Sound pressure level normalized by the plane-wave pressure in active noise control by a parametric speaker (a) and an ordinary speaker (b). The reduction point is 5 m on the central axis and the frequency is 1 kHz.

また、この結果は次図のように実際の実験でも確認された。



(a) Parametric speaker



(b) Ordinary speaker

Fig. 4 Measured reduction rates in 1-kHz active noise control by a parametric speaker (a) and an ordinary speaker.

(2) 電子的に指向性を制御可能なパラメトリックスピーカーを製作した。可調音の指向性は、送出する超音波の指向性と大きく関係した。単純な方位制御においては、超音波の送出方向と一致する。

方向制御において、ノイズ源と観測点を結ぶ直線上にスピーカーが無い場合は、前後方向のノイズ制御エリアは狭くなる。これは、ノイズの進行方向と、パラメトリックスピーカー音の進行方向が一致しないため、わずかな前後の位置の差が、位相のずれにつながるためである。

一方、広がり角は超音波の広がり角よりも狭くなるのが、実験及びシミュレーションにより明らかと成った。これは、可調音が超音波の2次の非線形性により生成されるためである。広がり角を広げた場合は、ノイズ制御エリアの左右上下方向への拡大効果は確認できたが、広げすぎると通常のスピーカーでのノイズ制御と同じく位相の不一致による音圧の上昇が現れてしまった。広がり角拡大による制御エリアの大きな拡大は困難との結論を得た。

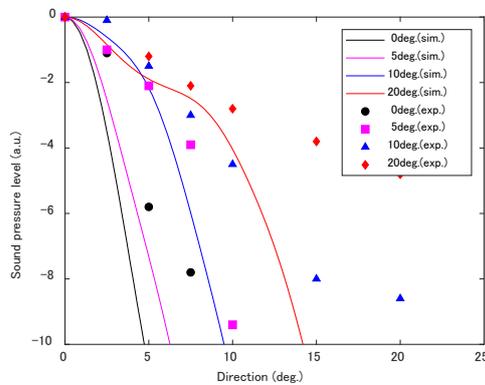


Fig. 5 Directivities of the sound generated by the parametric speaker controlled by the phase control of the transmitting elements. Results of the simulation and experiment controlled the divergence to 0, 5, 10 and 20deg.

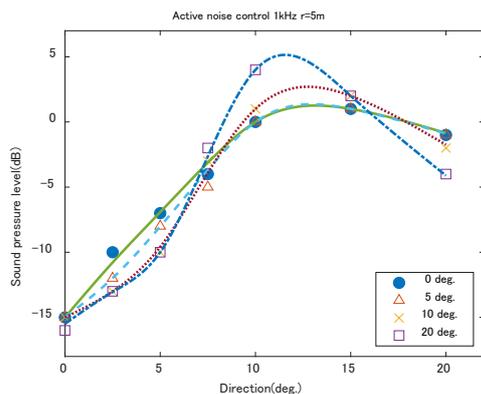


Fig. 6 Active noise control using divergence control of the parametric speaker.

(3) パラメトリックスピーカーの上 13cm の位置にモーションセンサー (Microsoft Kinect) を設置。人の骨格位置データを取得して、頭部の位置をトラッキングした。

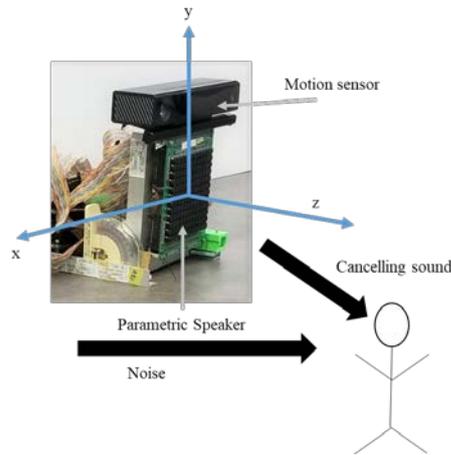


Fig. 7 System configuration of the active noise control by a beam-steerable parametric speaker with a human-tracking system equipped with a motion sensor

前方 2~3.5m、水平方向 0~0.75m、垂直方向 0 の範囲において、使用したモーションセンサーの頭部測定精度は、距離 0.02m、水平方向 1.1°、垂直方向 1.3° であった。測定された頭部位置における、ノイズ (単一周波数平面波音) の位相を計算し、パラメトリックスピーカーからの音波の位相が逆位相に成るよう、スピーカーから出る音の位相を計算した。また、頭部方向にパラメトリックスピーカーからの音を電子的に向ける。さらに、あらかじめ計算した補正データにより、頭部位置においてノイズ音の音圧とスピーカーの音圧が一致するようにスピーカーから出す音圧を調整した。下図に、頭部の位置が (0m, 0m, 2m) から (0.75m, 0m, 3.5m) (水平距離、垂直距離、前方距離) の間を直線状に移動した場合の、アクティブノイズ制御の結果を示す。ノイズ源はスピーカー後方 10m と十分離れており、60dB 一定である。スピーカーのアクティブノイズ制御を初期位置 (0m, 0m, 2m) とし、その後スピーカーの制御を行わない場合、移動開始後すぐにノイズキャンセリングの効果は無くなる。頭部位置に従い、スピーカーの方位と位相を制御すると、移動した場合のノイズキャンセリングの効果は +50cm の位置まで改善されている (-6dB 点)。さらに頭部位置に従い音圧の補正も行うと、+3m の位置までノイズキャンセリングの効果は維持された。本システムの動作速度は、Kinect の動作速度で制限され、最高 30fps と成った。

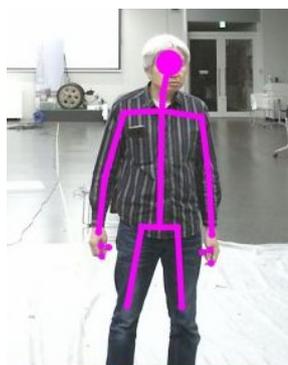


Fig. 8 Skelton image obtained by the sensor.

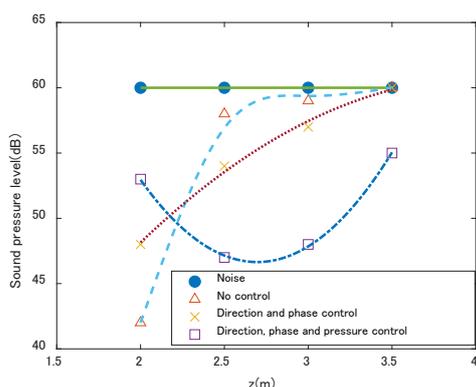


Fig. 9 Active noise control. The head is moved straight from  $(x, y, z) = (0.00 \text{ m}, 0.00 \text{ m}, 2.00 \text{ m})$  to  $(0.75 \text{ m}, 0.00 \text{ m}, 3.50 \text{ m})$  with and without the control of direction, phase and amplitude. Frequency 1 kHz.

## 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5件)

- ① Kumar Sahdev、Hideo Furuhashi, Characteristics of an ultrasonic phased array transmitter in medium range. Ultrasonics, 査読あり, Vol. 82, 2017, pp.331-335, 10.1016/j.ultras.2017.09.013
- ② Kumar Sahdev、Hideo Furuhashi, Characteristics of an ultrasonic phased array transmitter in the short range., Journal of Pure and Applied Ultrasonics 査読あり, Vol. 39, 2017, pp.27-33.

[学会発表] (計9件)

- ① Hideo Furuhashi, Yuki Matsui, and Madoka Oi, 査読あり, “Active noise control by a beam-steerable parametric speaker

with a human tracking system equipped with a motion sensor”, Inter Noise2018, 2018, to be published.

② Yuki Matsui, Madoka Oi, Geer Cheng, Xiuming Wu and Hideo Furuhashi, 査読あり, “Divergence control of ultrasonic sound waves generated by a parametric speaker”, International Congress on Ultrasonics 2017, 2017, p.21.

③ Hideo Furuhashi, Geer Cheng, Xiuming Wu, Madoka Oi, Yuki Matsui, 査読あり, “Numerical Analysis of Sound Wave Generated by a Parametric Speaker with Divergence Control of Directivity”, 3rd International Conference on Theoretical and Computational Acoustics, 2017, p.255.

④ Wei Quan, Cheng Geer, Sahdev Kumar, Hideo Furuhashi, 査読あり, “Characteristics of parametric speakers using a PDM amplifier”, Inter Noise2015, Vol. 250. No. 4, 2015, pp.2414-2421,

[その他]

ホームページ等

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

古橋 秀夫 (FURUHASHI, Hideo)

愛知工業大学・工学部・教授

研究者番号：40229125