337 3Dビームステアリングを用いたアクティブノイズコントロール

Active Noise Control using Three Dimensional Beam Steering

○ 皆川 健彦 (首都大学東京) 正 田中 信雄 (首都大学東京)
 Takehiko MINAGAWA, Tokyo Metropolitan University, 6-6 Asahigaoka, Hino-city, Tokyo

This paper deals with active noise control (ANC) using phased array speaker as a secondary source. Liner phased array speaker produces high directivity sound beam which lean to another direction against sound axis in two-dimensional region. ANC using a liner phased array achieves high degree of flexibility pinpoint control. This paper expands the steering range of high directivity sound beam to three-dimensional area from two-dimensional area by using a matrix phased array speaker and suggests ANC for three-dimensional acoustic field. Matrix phased array speaker enables efficient ANC system in arbitrary point in three-dimensional area.

Key words : Active noise control, Beam steering, Phased array speaker

A1. はじめに

産業の発達に伴い増加の一途をたどる騒音問題に対し、アクティブノイズコントロール(ANC)という技術が注目されている。騒音に対して同振幅逆位相の制御音を与えることにより、音波の干渉により制御点の音圧を抑制する技術である。従来の研究では制御音源にボイスコイル型スピーカ用いられてきたが、近年ではパラメトリックスピーカやリニアフェイズドアレイスピーカなど、指向性の高いスピーカを制御音源に用いたANCが考案され、ボイスコイル型スピーカを用いた手法と比べた場合、制御点の周囲における音圧の上昇を抑えたANCが実現されている。

リニアフェイズドアレイスピーカとは、ホイヘンスの原理に基づき、音源面に対して傾いた角度を持つ擬似的波面を形成させるフェイズドアレイという技術を応用し、スピーカの音軸に対して二次元方向の任意の角度に向けて強い指向性を舵取りすることができるという特徴がある。

本研究では指向性のステアリング可動域を二次元領域から三次元領域に拡大した、マトリックス型フェイズドアレイスピーカを制御音源に用いたANCを試みる。強い指向性(ビーム)をもつ音波を三次元領域の任意の点に向け舵取り(ステアリング)することにより、より自由度の高いANCが可能になると期待される。

A2. マトリックスフェイズドアレイスピーカを用いたANC

リニアフェイズドアレイにおいて舵取りされた指向性は、同一直線上に等間隔で配列された素子に微小な遅延時間 $\Delta\tau$ を与えることにより得られるが、マトリックスフェイズドアレイでは、音軸を y 方向としたとき、 x 方向、 z 方向にそれぞれ $\Delta\tau_x$ 、 $\Delta\tau_z$ を与えることにより三次元領域の任意の点に指向性を舵取りする。ここで、ボイスコイル型スピーカと、ステアリング角を $\theta_s=30^\circ$ 、 $\phi_s=30^\circ$ としたマトリックスフェイズドアレイとをそれぞれ制御音源に用いた場合のANCの比較をした場合、制御点における音圧の抑制は両者共に達成されているが、マトリックスフェイズドアレイを制御音源として用いた場合においては、周囲への影響が小さいということが言える。

Fig.A1 ANC using a voice-coil type speaker

Fig.A2 ANC using a matrix phased array speaker

A3. 結言

- (1) マトリックス状に配列されたフェイズドアレイスピーカのパラメータの最適な設計方法を明らかにした。
- (2) 2次元領域から3次元領域に拡大されたビームステアリングをANCに応用することで、制御点の設定を選ばず、かつ周辺に与える影響が少なく、高自由度・高効率のANCシステムが可能になる事を示した。

1. 序論

制御音により騒音を制御するアクティブノイズコントロール(ANC)の理論は古く、Luegの特許⁽¹⁾まで遡ることができる。ANCを実行するには精密な信号処理が必要なため、当時のアナログ技術では制御効果に限界があったが、近年の高性能で安価なDSP(Digital Signal Processor)の普及により、ANCが静粛化の手法として用いられるようになった。ANCとは、制御音源から放射される制御音により、センサ箇所において騒音を抑制する技術である。ANCにおける問題点は、制御音源より放射される音が制御点以外にも伝播してしまうため、制御点において音圧の抑制をできても、それ以外の箇所においては音圧の増加を招いてしまうということにある。加えて、ANCを適用するにあたり、ユーザリティの観点よりフィードフォワード制御法を適用することが多い。この場合、制御音源を駆動する参照信号が必須となるが、センサ出力とコヒーレンスの確実な騒音をマイクロフォンより直接採取しようとする、制御音の混在によりシステムが不安定化する懸念があり、ANCの実利的な構築の妨げとなっている。

ここで、制御音に球面波でなく光のように指向性の高い音波を用いた場合、上述の問題は解決される。すなわち、ターゲットとする制御点における音圧抑制を達成し、かつ他所に影響を及ぼすことのないANCが可能になる。さらに、騒音が到来する箇所にマイクロフォンを設置しても、これに制御音は進入しないので、制御系の構築も簡素で安定したものとなる。これを可能とするものがパラメトリックスピーカ(PAL)である。PALを用いたANCの分野におけるこれまでの研究として、2005年にTan・田中⁽²⁾はPALを制御音源とするANCシステム構築の可能性について論じている。2008年には小松崎⁽³⁾が実験の見地よりPALによる音圧抑制の可能性について論じており、田中・相原⁽⁴⁾がPALをANCに組み込んだ制御システムを構築し、実験によりその有意性を示した。

しかし、PALを制御音源に用いた場合、その高い指向性が裏目に出てしまう場合がある。これは、高い指向性を持つが故に、スピーカの音軸上でしか制御ができないためである。したがって、スピーカの向きを変えることができない場合、これはANCシステムとして死活問題と成り得る。これを補完する技術がフェイズドアレイである。フェイズドアレイは、非破壊検査や医用超音波診断機器などに用いられている技術であり、振動子を一列に幾つか並べ、各素子の位相を遅延させることにより、ホイヘンスの原理を利用し、音源面と異なる角度を持つ疑似的波面を形成することができる。このフェイズドアレイをパラメトリックアレイに適用することで、超音波の波面の角度を電子的にステアリングし、二次的に生じる差音の伝搬方向を変えることが可能となる。N.田中・M.田中⁽⁵⁾は、リニアフェイズドアレイをパラメトリックスピーカに適用し、ANCに用いることで二次元音場領域の任意の制御点の音圧低減を保証し、かつ制御点以外の領域への影響が少ないシステムを実現した。

本研究では指向性のステアリング可動域を二次元領域から三次元領域に拡大したマトリックスフェイズドアレイスピーカを用いたANCを試みる。強い指向性(ビーム)をもつ音波を三次元領域の任意の点に向け舵取り(ステアリング)することにより、より自由度の高いANCが可能になると期待される。

2. 理論

2.1 マトリックス型フェイズドアレイの設計

リニアフェイズドアレイにおいて舵取りされた指向性は、

Fig.1 Geometry model of matrix phased array speaker

同一直線上に等間隔で配列された素子に微小な遅延時間 $\Delta\tau$ を与えることにより得られるが、マトリックスフェイズドアレイでは、音軸を y 方向としたとき、 x 方向、 z 方向にそれぞれ $\Delta\tau_x$, $\Delta\tau_z$ を与えることにより三次元領域の任意の点に指向性を舵取りできる。開空間場において理想的な点音源が発する音の音圧は式(1)で記述される。

$$p(r, t) = \frac{j\omega\rho_0 q}{4\pi r} \cdot \exp\{j(\omega t - kr)\} \quad \dots\dots\dots (1)$$

一つの素子が無数の点音源から成ると仮定した上で、Fig.1のようにマトリックス状に配列された素子に微小な遅延時間 $\Delta\tau_x$, $\Delta\tau_z$ を与えて励振させた時、任意の点に及ぼす音圧 $p(r, \theta, \phi, t)$ は式(2)のように記述できる。

$$\begin{aligned} P(r, \theta, \phi, t) &= \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N P_{ij} \\ &= \frac{j\omega\rho_0 q}{4\pi r} \cdot \exp\{j(\omega t - kr)\} \cdot \text{sinc}\left(\frac{k a \sin \theta}{2}\right) \\ &\quad \times \exp\left(\frac{j k a \sin \theta}{2}\right) \frac{\sin \frac{N(\omega \Delta\tau_x - k d \sin \theta)}{2}}{\sin \frac{\omega \Delta\tau_x - k d \sin \theta}{2}} \\ &\quad \times \exp\left\{-j\left(\frac{\omega \Delta\tau_x - k d \sin \theta}{2}\right)(N-1)\right\} \\ &\quad \times \text{sinc}\left(\frac{k a \sin \phi}{2}\right) \cdot \exp\left(\frac{j k a \sin \phi}{2}\right) \\ &\quad \times \frac{\sin \frac{N(\omega \Delta\tau_z - k d \sin \phi)}{2}}{\sin \frac{\omega \Delta\tau_z - k d \sin \phi}{2}} \\ &\quad \times \exp\left\{-j\left(\frac{\omega \Delta\tau_z - k d \sin \phi}{2}\right)(N-1)\right\} \dots\dots\dots (2) \end{aligned}$$

ここで、 $k = \omega/c$:波数、 c :音速、 ω :角周波数、 a :素子幅、 d :素子間隔、 N :素子数 である。

また幾何学的関係より

$$\begin{aligned}\theta_s &= \sin^{-1}(c\Delta\tau_x/d) \\ \phi_s &= \sin^{-1}(c\Delta\tau_z/d) \dots\dots\dots (3)\end{aligned}$$

がステアリング角として与えられる。

次にリニアフェイズドアレイの指向性関数を角度 θ について式(4)のように定義する。

$$\begin{aligned}D(\theta) &= \frac{|p(r, \theta, t)|}{|p(r, \theta_s, t)|} \\ &= \left| \frac{\text{sinc}\left(\frac{ka \sin \theta}{2}\right)}{\text{sinc}\left(\frac{ka \sin \theta_s}{2}\right)} \cdot \frac{\sin \frac{N\pi d (\sin \theta_s - \sin \theta)}{\lambda}}{N \sin \frac{\pi d (\sin \theta_s - \sin \theta)}{\lambda}} \right| \dots\dots\dots (4)\end{aligned}$$

$D(\theta)$ は θ のみの関数で与えられ、装置の性能は振動子のパラメータ a , d , N に依存する。 $D(\theta)$ を最適に設計することにより、リニアフェイズドアレイスピーカの指向性が向上される。 ϕ についても式(4)と同様の指向性関数を用いて $D(\phi)$ の最適設計を行い、最適設計された $D(\theta)$ および $D(\phi)$ を組み合わせを、マトリックスフェイズドアレイスピーカの指向性関数として設計に用いる。

Fig.2 は、ステアリング角を 30° として、 $-90^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$ の音場に生じた典型的な指向性を示す。指向性関数における最適な設計として、

- ・メインローブの鋭利化
- ・グレーティングローブの除去
- ・サイドローブの抑制

の3点を目指す。本論文では素子幅 a が微小である事を仮定し、素子数 N 、素子間隔 d 、に注目する。式(4)の指向性関数より、メインローブ幅を狭くし、かつグレーティ

$$d \leq d_{\max} = \frac{\lambda}{1 + \sin(\theta_s)_{\max}} \frac{N-1}{N} \dots\dots\dots (5)$$

ングローブを避けるには、

を与えることが有効である。ここで $d_{\max}$ はグレーティングローブを生じない最大の素子間隔であり、 $(\theta_s)_{\max}$ は最大ステアリング角である。この操作を ϕ においても行い、 θ_s と ϕ_s のうち稼動域の広い方の $d_{\max}$ をマトリックスフェイズドアレイスピーカの素子間隔として採用する。また N を増加させることでメインローブの鋭利化、サイドローブの抑制が得られるが、 N の増加は同時に装置の複雑化、巨大化を伴うため、 $N=8 \sim 16$ に設定するのが妥当である。

Fig.2 Directivity function of linear phased array speaker

3.3D ビームステアリングを用いた ANC の実験

3.1 実験装置及び実験方法

一般的なボイスコイル型スピーカと、指向性をステアリングさせた状態のマトリックスフェイズドアレイスピーカの二種類の制御音源を用いて ANC の実験を行い結果を比較した。1250Hz の騒音を対象とし、適応アルゴリズムには Filtered-x LMS を使用した。マトリックスフェイズドアレイスピーカは、 $N=4 \times 4=16$ 、 $d=d_{\max}$ として設計し、ステアリング角を $\theta_s=30^\circ$ 、 $\phi_s=30^\circ$ とした。Fig.3-1 に実験装置の配列図を示す。測定する音場は $1.35\text{m} \times 1.35\text{m} \times 1.35\text{m}$ の三次元空間とし、0.15m 刻みでマイクロホントラバースを用いて、騒音源のみの場合、ボイスコイル型スピーカを用いた場合の ANC、マトリックスフェイズドアレイスピーカを用いた場合の ANC において音圧を計測し、数値解析と合わせて Fig.5~Fig.10 のように音圧分布を得た。騒音源、制御音源、及び制御点の位置関係を Fig.4 に示す。

Fig.3 Schematic design of experimental setup

Fig.4 Schematic design of experimental arrangement of a microphone and speaker

Fig.5 Numerical analysis of noise source acoustic pressure distribution

Fig.8 Noise source acoustic pressure distribution

Fig.6 Numerical analysis of ANC using a voice-coil type speaker

Fig.9 ANC using a voice-coil type speaker

Fig.7 Numerical analysis of ANC using a matrix phased array speaker

Fig.10 ANC using a matrix phased array speaker

3.2 実験結果及び考察

Fig.9 に示される通常のボイスコイル型スピーカによる ANC と、Fig.10 に示されるマトリックスフェイズドアレイスピーカによる ANC の実験結果について、それぞれの制御効果を比較する。ターゲットとした制御点において、前者に 15.5[dB]、後者に 14.5[dB] の音圧低減が見られ、両者共に高い制御効果を確認できた。

次に、ボイスコイル型スピーカとマトリックスフェイズドアレイスピーカを用いた ANC において、制御前(Fig.8)と制御後(Fig.9,10)の音圧分布をそれぞれ比較する。Fig.9 のボイスコイル型スピーカを用いた ANC では、制御前に比べ広い領域で音圧の悪化が見られるのに対し、Fig.10 のマトリックスフェイズドアレイスピーカを用いた実験結果では、制御音源の周囲への影響を小さくできていることが分かる。

最後に、ANC の実行前後における音場全体の音圧変化を比較すると、ボイスコイル型スピーカによる ANC では 16.0% 音圧が上昇したのに対し、マトリックスフェイズドアレイスピーカによる ANC では音圧上昇を 5.9% に抑えることができた。したがって、マトリックスフェイズドアレイスピーカの制御音源としての有用性が示されたといえる。

4. 結言

マトリックスフェイズドアレイスピーカの最適設計を行い、実際に試作するとともに、ANC 実験を行いその有用性を明らかにした。以下に本論文により得られた成果を要約する。

- (1) マトリックス状に配列されたフェイズドアレイスピーカのパラメータ(素子数, 素子幅, 素子間隔, ステアリング角)の最適な設計方法を明らかにした。
- (2) ビームステアリングを二次元領域から三次元領域に拡大することにより、より自由度の高い ANC が可能になることを示した。
- (3) 1250Hz の騒音に対して、3D ビームステアリングを ANC に応用することで、制御点の設定を選ばず、かつ周辺に与える影響が少ない、高自由度・高効率のアクティブノイズコントロールシステムが可能になる事を示した。

文献

- (1) P.Lueg, "Process of silencing sound oscillations", US Patent No. 2043416 (1936)
- (2) A.C.H. Tan and N. Tanaka, Identifying the attributes of a parametric array loudspeaker, Proceedings of the 11th Asia-Pacific Vibration Conference, 1(2005), pp. 253-259
- (3) T.Komatsuzaki, Active Noise Control Using High-directional Parametric Loudspeaker (Experimental Study on Radiated Field, JSME, Vol. 74, No. 737(2008), pp. 75-82.
- (4) Y. Aihara and N. Tanaka, Active Noise Control using Strongly High Directive Sound Sources, Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers. C 75(750) pp.357-364 2009/2
- (5) M. Tanaka and N. Tanaka, ACTIVE NOISE CONTROL USING A STEERABLE PARAMETRIC SPEAKER, Department of Aerospace Engineering, (2008)
- (6) S.C. Wooh and Y. Shi, "Influence of phased array element size on beam steering behavior", Ultrasonics, 36, (1998), 737-749.
- (7) Dan J. Ramsdale and Roger A. Howerton, "Effect of element failure and random errors in amplitude and phase on the sidelobe level attainable with a linear array", J. Acoust. Soc. Am. 68(3), Sept, (1980), 901-906.
- (8) 山本優一郎, 超音波フェイズドアレイの基本原理, 溶接学会誌, 第 74 巻, 第 4 号(2005), 29-32