

IV-18

3次元空間内での能動的騒音制御

北海道大学工学部 小幡 和彦
 北海道大学工学部 正会員 長谷部正基
 北海道大学工学部 正会員 金安 公造

1. はじめに

近年のエレクトロニクス、デジタル信号処理技術の進歩により、能動的騒音制御に関する研究が盛んである。能動的騒音制御とは、「音波の干渉を利用するものであって、ある音波に対して、別の音源（二次音源）から同振幅、逆位相の音波を付加して、能動的に原音を減衰させる制御法」のことである。

(図1参照)

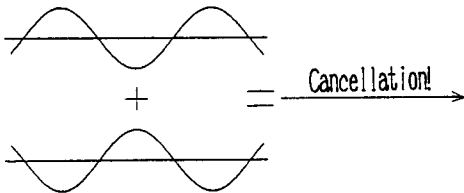


図1

この制御方法は、既に空調用ダクトなどの1次元音場においては実用化段階に達している。一方3次元空間を制御する研究も行われている。しかしながら3次元空間の制御対象は1点ではなく空間領域である。また反射、回折等を含んだ複雑な音場を制御する必要があり、未解決の部分が多く、従って室内空間や道路交通騒音等の3次元空間に適用するには至っていない。¹⁾

本研究では現在の都市内の騒音制御の手法である遮音壁に代わる新しい騒音制御手法として、能動的騒音制御に注目し、その適用の可能性を検討している。^{2), 3)} これまでに本研究で得られた成果を列挙すると、

- ・1次元音場で制御を3次元空間に応用して1点での制御を行った。

- ・反射面のある音場を想定して、2次音源を2個用いることによりこれを解消し、安定した消音効果を得た。

である。一方、

- ・系の安定性の確保
- ・音が減衰せず、逆に増幅する領域が存在すること

・系の変化に追従する適応型システムの必要性が、解決すべき問題として残った。そこで本研究はこれらの点を解決することを目的として、2次音源に指向性音源を採用し、コントローラに適応型システムを用いて3次元空間を制御することを試みる。指向性音源を用いることにより系の安定性が改善され、更に音が増幅する領域も小さくすることを目指した。適応型制御にLMS(Least Mean Square) アルゴリズム及びFiltered-X LMSアルゴリズムを用い、系の特性の変化に対応したシステムを構築する。

2. 能動的騒音制御の理論

能動的騒音制御の方法は、騒音源からの音を参照用マイクロホンで受信し、その信号を「逆フィルタ」と呼ばれる位相を反転させるフィルタに通し、二次音源から放射することにより、消音動作をさせるものが一般的である(図2参照)。

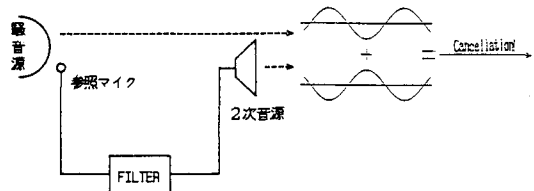


図2

Active Noise Control in a Three-Dimensional Space

By Kazuhiko OBATA, Masaki HASEBE and Kozo KANEYASU

フィルタ処理を実現させるためには、非常に高速の演算器が必要となる。本研究では信号処理用に開発されたCPU、ディジタルシグナルプロセッサ(DSP)を使用する。具体的にフィルタとしてはFIRディジタルフィルタを用い、その係数を制御するコントローラとしてDSP組み込んだパーソナルコンピュータを用いる。

能動的騒音制御は予備測定型制御と適応型制御の2つに分類することができる。予備測定型制御とは、予め音場の特性を測定しておき、その情報から消音が働くようにフィルタの特性を決定する方法である。一方、適応型制御とは、コントローラが自動的に消音が働くようにフィルタの特性を順次変化させる方法である。

2-1 予備測定型能動的騒音制御

予備測定型騒音制御のブロックダイアグラムを図3に示す。騒音源をN、マイク1からコントローラへの入力信号をR、2次音源からの出力信号をS、消音対象点であるマイク2からコントローラへの入力信号をMとする。NからRへの伝達関数を T_{RN} とし、他の伝達関数も同様に表す。また未知のコントローラの伝達関数を H_c とする。

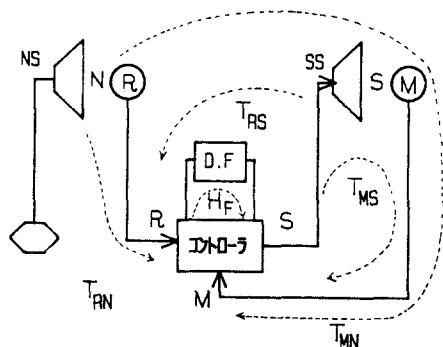


図3

(NS: 騒音源, SS: 2次音源, D.F: FIRディジタルフィルタ)

ここで信号及び伝達関数について、

$$R = T_{RN}N + T_{RS}S \quad (1)$$

$$S = H_F R \quad (2)$$

$$M = T_{MN}N + T_{MS}S \quad (3)$$

が成り立つ。これらの式からN、Sを消去し、マイク2からの入力信号が0、すなわち $M=0$ とすると、

未知のコントローラの伝達関数が決定できる。

$$T_F = \frac{T_{RN}}{T_{RS}T_{MN} - T_{MS}T_{RN}} \quad (4)$$

この伝達関数を逆フーリエ変換して得られる特性がFIRフィルタに組み込まれ、消音が行われる。

2-2 適応型能動的制御

予備測定型制御では、系の特性が変化する場合では消音効果は薄れる。この場合は適応型制御が有効である。

本研究では適応信号処理の分野でアルゴリズムの簡便さとリアルタイムでの処理が可能な点から、広く用いられている、LMS アルゴリズムをコントローラに組み込んだ。またエラー信号の時間遅れ等を考慮にいれたFiltered-X LMSアルゴリズムの利用も行った。

2-2-2 LMSアルゴリズム⁴⁾

LMS アルゴリズムによる能動的騒音制御の概要を図4に示す。

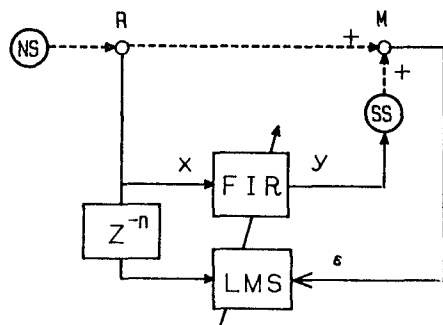


図4

LMS アルゴリズムは、時刻kにおけるフィルタの特性を(5)式によって更新する適応アルゴリズムである。

$$W_{k+1} = W_k - 2\mu \varepsilon_k X_k \quad (5)$$

ここで添え字kは時刻kにおける値を示しており、 W_k はフィルタの係数列、 X_k は入力値系列、 μ は収束速度と安定性を決定する定数である。また ε_k は誤差信号を表し、(6)式で表される。

$$\begin{aligned} \varepsilon_k &= n_k + y_v \\ &= n_k + W_k^T X_k \end{aligned} \quad (6)$$

(n_k : 騒音源の信号、 y_k : コントローラの出力信号)

なお、(5)式からわかるように新しいコントローラの特性 W_{k+1} を計算するには ε_k と X_k の情報が必要とする。しかしながら2次音源から出力された信号は音響系の時間遅れなどを持つので、誤差信号には直ちに反映されない。したがって図4に示したようにLMSアルゴリズムに入力される信号 X_k に時間遅延 Z^{-n} を考慮したアルゴリズムを用いることによって安定に働くシステムが可能となった。

2-2-3 Filtered-X LMSアルゴリズム

Filtered-X LMSアルゴリズムは2次音源と消音目的点であるマイク2の間の音響特性を測定し、それをLMSアルゴリズムに組み込んだものである。従ってこのアルゴリズムは前述した時間遅れに加えて、スピーカの特性、マイクの特性も考慮されている。この概念図を図5に示す。

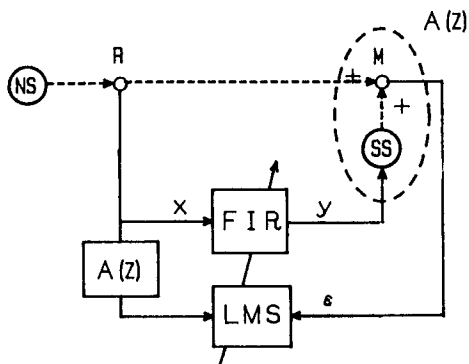


図5

($A(z)$: 2次音源とマイク2の間の音響特性)

3 指向性音源の作製

音場内に1つの点音源が存在するとき、その音圧は放射状に分布する。これをモノポール(Monopole)音源という。

$$P_m = \frac{P}{r} \exp \{j(\omega t - kr)\} \quad (7)$$

(P : 振幅、 r : 音源からの距離、 j : 虚数、 ω : 角周波数、 t : 時刻、 k : 波数)

次に正極性の点音源と負極性の点音源が近接して存在するとき、その音圧は8の字型の指向性を示す。これをダイポール(Dipole)音源という。

$$P_d = j \frac{P'}{r^2} \cos \theta \exp \{j(\omega t - kr)\} \quad (8)$$

(P' : 振幅、 θ : ダイポールの軸となす角度)

モノポール音源とダイポール音源の $\theta = 0^\circ$ の位置での位相は(7)、(8)から90度ずれていることが解る。従ってモノポール音源の位相を90度ずらして放射すると一定方向だけに指向性を示す音源となる。これをトライポール(Tripole)音源という。(図6参照)

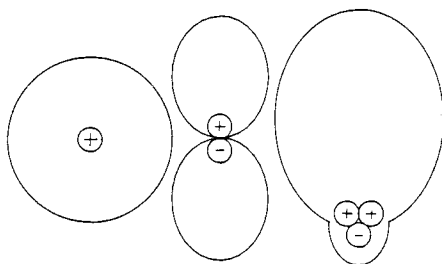


図6

このトライポール音源を2次音源に採用すれば、2次音源から出力される信号が参照用マイクへ帰還せず、システムの発振を防ぐことができる。また音が増幅する地点を少なくすることも合わせて可能である。更に反射面のある音場でも複数個の2次音源を用いるため、安定した消音効果を得ることが可能である。

4. 実験

4-1 実験装置

DSPにはAT&T社製DSP32Cを採用し、DSPをサポートするAD変換器、DA変換器等はMtt社製Lory Plus信号処理システムを用いた。実験は本研究室内の無響室で行った。実験の際の幾何学的配置を図7に示す。

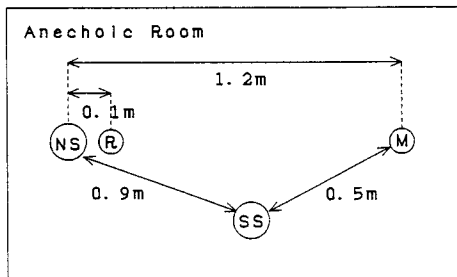


図7

4-2 実験結果

実験は適応型制御の効果を確認するため、2次音源にモノポール音源を用いて行った。

図8に予備測定型能動的騒音制御の結果を示す。

図9にLMS アルゴリズムによる適応型能動的騒音制御の結果を示す。

図10にFiltered-X LMSアルゴリズムによる適応型能動的騒音制御の結果を示す。

システム作動前とシステム作動後で各周波数で均等な消音効果が得ることがわかる。

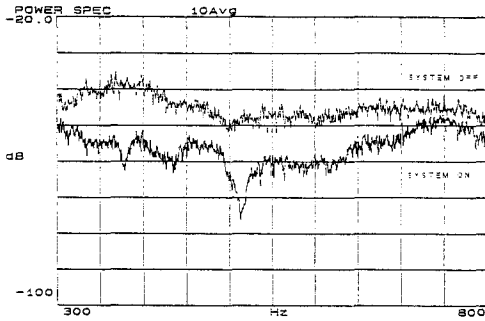


図8

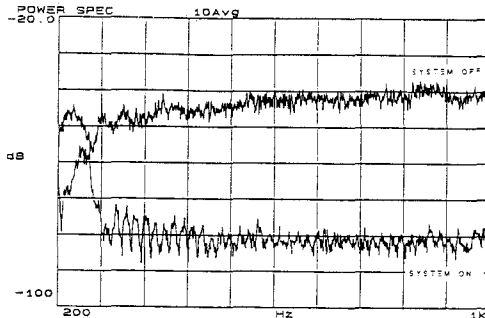


図9

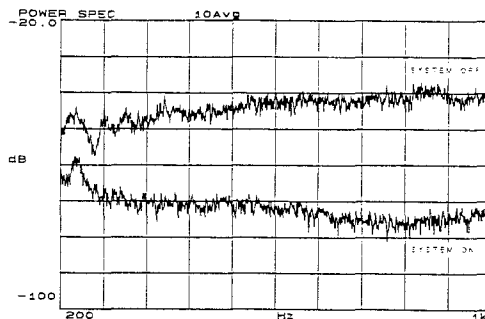


図10

5. まとめ

本研究では、3次元空間の能動的騒音制御に、適応型制御と指向性音源を用いて行っている。適応型制御により系の特性の変化にも対応できるシステムが構築された。また、予備測定型制御に比べてより効果的に消音が行われた。指向性音源を利用して行った実験結果は講演時に提示する。系の安定性を確保し、また音が増幅する領域を少なくすることが可能であった。

今後の一点での制御から複数点更には領域内の制御を行うことが課題として挙げられる。

【参考文献】

- 1) 金田豊：“知的マイクロホンシステム—マイクロホンの指向性制御技術と最近の音響システム研究の課題—”、計測と制御28巻(1989)53-58
- 2) 佐藤克人：“三次元空間での能動的騒音制御に関する研究” 北海道大学環境科学研究科修士論文
- 3) 佐藤新市：“反射のある三次元音場での能動的騒音制御に関する研究” 北海道大学工学研究科修士論文
- 4) B.Widrow and S.D.Stearns: "ADAPTIVE SIGNAL PROCESSING", Prentice-Hall(1985)
- 5) M.J.M.Jessel and G.A.Mangiante: "Active sound absorbers in an air duct" Journal of Sound and Vibration(1972)23(3)391-396