

室内の能動雑音低減*

久恒恵一

大分大学工学部

1. まえがき

室内などの雑音環境の改善法の一つに能動雑音制御¹⁾がある。この能動雑音制御はダクト等の騒音対策に広く用いられ、実用化もされている。しかし、この方法の室内などの雑音対策についての検討はまだ十分ではない。特に、雑音制御可能域をできるだけ広く取れるようにすることが必要である。室内の能動雑音制御においては、対象雑音信号や音源方向が直接入手出来れば、より効果的な能動雑音制御が可能となる。

能動雑音制御の一つの試みとして、能動音源とマイクロホンアレイを用いた信号検出法²⁾を併用した方法を本報告で示す。本法では、多音源場における任意仮想位置で制御対象雑音信号を検出することが出来る。また、対象雑音の到来方向の推定も可能なのでより効果的な能動音源の設定ができる。本システムは、マイクロホンアレイを用いた雑音検出部と雑音方向推定部、および能動音源とその入力信号の制御部で構成されている。制御部では入力信号である検出雑音を用いて制御点での雑音が最小になるように適応的に制御する。これまでに、1音声と1雑音の2音源場についての雑音制御可能面積の実験結果を報告している³⁾。本報では、1音声と2雑音の3音源場での雑音低減量とともに制御可能体積についてのシミュレーション実験結果を示す。制御可能域の検討は、音声対雑音レベル、雑音検出部や適応制御部で用いているFIRフィルタのタップ数および能動音源の設定角度をパラメータにして行った。

2. 能動雑音低減

能動雑音低減システムをにFig.1に示す。音場は1音声源 S_1 と2種類の雑音源(S_2 と S_3)の多音源場とする。この音場中に立方体で図示した雑音制御対象域を設定し、この領域でできるだけ両雑音が低減できるようにする。本システムは主として、○印で示したマイクロホンアレイ、マイクロホンアレイからの受信信号から雑音信号とその到来方向を求める雑音検出部と雑音方向推定部、および能動音源とその制御部で構成されている。雑音検出部はFIRフィルタで構成されており、任意仮想位置での雑音検出が

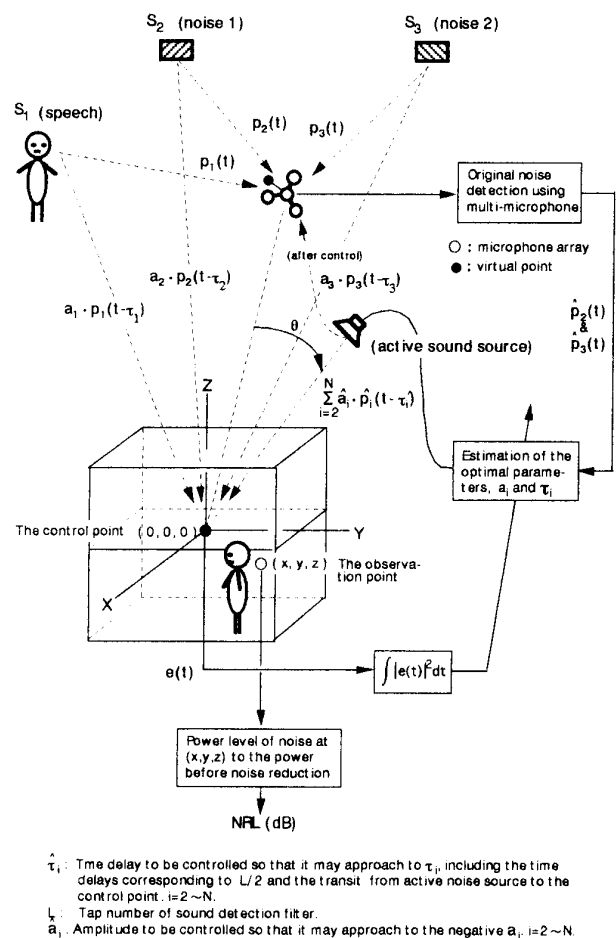


Fig.1 Active noise reduction system.

* Active noise reduction based for improving the noisy room condition. Keiichi Hisatsune, Faculty of Engineering, Oita University

可能である。また、制御部では能動音源への入力信号である検出雑音を用いて制御点での雑音が最小になるように各雑音を適応的に制御する。そして、制御対象領域の雑音低減量NRL(雑音低減前の雑音パワーの低減後のパワーに対するレベル)を求め、更に、NRLが0dB以上の有効雑音低減域を評価する。

マイクロホンアレイ近くに●印で示した仮想受音点の位置での音声信号を $p_1(t)$ 、2個の雑音信号をそれぞれ $p_2(t)$ と $p_3(t)$ とする。また、それらのサンプル値を $p_1(k)$ 、 $p_2(k)$ および $p_3(k)$ とする。 k は離散時間である。マイクロホンアレイの素子数は4である。4個のマイクロホンによる受信信号は雑音検出部と音源方向推定部に入力され、仮想受音点での雑音信号と雑音源方向を検出する。検出した雑音信号をそれぞれ $p_2(k)$ と $p_3(k)$ とする。また、雑音源方向の推定値を θ_1 と θ_2 とする。雑音信号とその方向の検出法は既に報告しているので省略する³⁾。検出された雑音信号を能動音源に入力し、雑音制御域に向けての制御音として放射する。その時、制御対象域内の●印で示した最適制御点(0,0,0)での雑音レベルが最小になるように制御対象雑音の振幅と遅延時間を適応的に制御するとともに、雑音源方向 θ_1 と θ_2 および最適制御点を参考にして能動雑音源を適正位置に設置する。

本研究での能動音源を用いた雑音低減の概要を次に示す。ここでは音声を含めた音源数を N 個とする。仮想受音点での音声および雑音信号を基準にすると、制御点(0,0,0)での音声とその他の雑音はそれぞれ $a_i p_i(k-\tau_i)$ ($i=1$: 音声, $i=2 \sim N$: 雑音)と表せる。 a_i は i 番目の音源から仮想受音点の距離と音源から制御点までの距離に対応した距離減衰係数である。また、 τ_i は仮想受音点から各音源を経由した制御点までの距離に対応した遅延数である。従って、能動雑音制御前の制御点での受信信号 $e(k)$ は音声と制御対象の雑音を分けて示すと、

$$e(k) = a_1 p_1(k-\tau_1) + \sum_{i=2}^N a_i p_i(k-\tau_i) \quad (1)$$

と表せる。ここで、検出した i 番目の雑音

$\hat{p}_i(k)$ の振幅を \hat{a}_i 倍、また離散時間 k を $\hat{\tau}_i$ だけ遅延した信号を生成し、 i が2から N まで加算した信号を能動音源に入力する。この時の制御点の信号 $e(k)$ は

$$e(k) = a_1 p_1(k-\tau_1) + \left[\sum_{i=2}^N a_i p_i(k-\tau_i) - \sum_{i=2}^N \hat{a}_i \hat{p}_i(k-\hat{\tau}_i) \right] \quad (2)$$

となる。ここで、この $e(k)$ から求められる誤差

$$\varepsilon = \sum_{k=0}^{L-1} |e(k)|^2 \quad (3)$$

が最小となるようにLMS法により \hat{a}_i と $\hat{\tau}_i$ の最適値を求める。つまり、制御点の雑音の低減を行う。 L はFIRフィルタのタップ数である。なお、 $\hat{\tau}_i$ には能動音源から制御点までの遅延時間と信号検出フィルタのタップ数 L の半値に対応した遅延数が含まれている。

雑音低減性能は次の式で与えられる雑音低減量NRLで評価した。

$$NRL = -10 \log \left(\frac{W_b}{W_a} \right) \quad (4)$$

W_a と W_b は雑音低減前と雑音低減後の音声の無音声区間に含まれる雑音のパワーを示す。この雑音低減量は制御点を含めた $1\text{m} \times 1\text{m} \times 1\text{m}$ の制御評価域内の観測点 (x,y,z) について求めた。更に、NRLが正となる雑音制御可能体積を求めた。上述した制御点での最大雑音低減量と制御可能体積の検討を、音声対雑音レベルSNR、帯域雑音の中心周波数 f_0 、雑音検出部や適応制御部で用いているFIRフィルタのタップ数 L および能動音源の設定角度 θ をパラメータにして行った。

3. 実験結果

数値シミュレーションの説定条件を以下に示す。音源は音声源と2個の雑音源である。従って、マイクロホンの素子数4個で、その内の3個で2個の雑音信号を検出

し、残りの1個の受信信号を用いて雑音源方向を推定する。各音源のマイクロホンアレイまでの距離はともに1mで、音源と2個の雑音源の仰角と方位角 (θ_i, φ_i) はそれぞれ、 $(30^\circ, 0^\circ)$ 、 $(30^\circ, 180^\circ)$ 、 $(0^\circ, 180^\circ)$ とした。音声は数字音声/zero/で、音源2の雑音は上限遮断周波数が500Hzの低域雑音である。また、音声のこの雑音に対するパワーレベルSNRは5dBとした。一方、音源3の雑音は帯域が2オクターブの帯域雑音であり、その中心周波数 f_0 とパワーレベルSNRをパラメータとした。 f_0 は500Hz、1kHzおよび2kHzの3種類で、SNRは15dBから-15dBまでの5dB間隔での7種類とした。雑音検出と雑音制御のFIRフィルタのタップ数 L もパラメータとし、64から256までの3種類とした。なお、仮想音源はマイクロホンアレイ軸の原点とした。

雑音検出についての実験結果の1例をFig.2に示す。上の3個の波形が各音源信号の原信号である。上から数字音声 $p_1(k)$ /zero/で、2番目が500Hz以下の低域雑音 $p_2(k)$ で、3番目が $f_0=1$ kHzの帯域雑音 $p_3(k)$ である。また、 $p_3(k)$ のSNRは0dBであり、タップ数は64としている。中央の波形が雑音検出システムを用いない時の受信信号で、上の3信号の和信号である。下の3波形が本システムで検出された信号で、上から数字音声 $\hat{p}_1(k)$ と2雑音、 $\hat{p}_2(k)$ と $\hat{p}_3(k)$ の検出信号 $\hat{p}_1(k)$ 、 $\hat{p}_2(k)$ および $\hat{p}_3(k)$ である。 $\hat{p}_2(k)$ と $\hat{p}_3(k)$ はそれぞれ $p_2(k)$ と $p_3(k)$ によく対応しており、雑音の検出ができてることが示されている。

ここで得られた $\hat{p}_2(k)$ および $\hat{p}_3(k)$ を能動音源信号とした制御点 $(0,0,0)$ での雑音低減の実験結果をFig.2に示す。上の3波形は数字音声と2雑音の制御点での原信号であり、 $a_i p_i(k-\tau_i)$ ($i=1$: 音声 $i=2\sim3$: 雑音)を意味する。下から2番目が能動雑音制御作動前(system : off)の受信信号 $e(k)$ ((1)式)で、一番下が能動雑音制御作動後(system : on)の受信信号(制御後の(2)式)である。下から2番目の制御作動前の波形では雑音に埋もれて数字音声は確認できないが、一

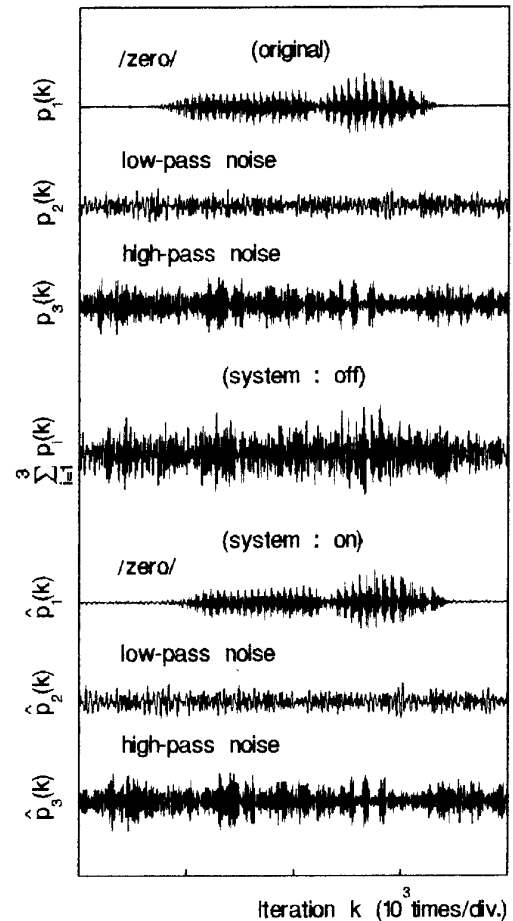


Fig.2 Performance of the noise detection for one digit and two noises.

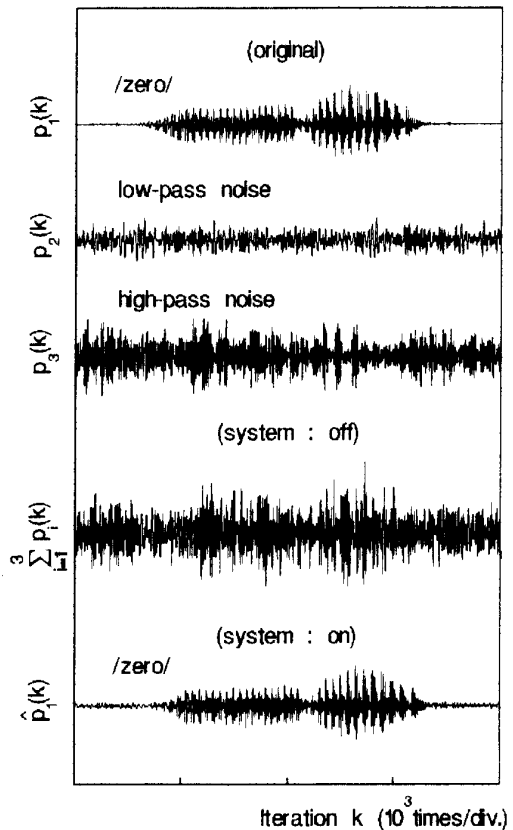


Fig.3 Performance of the active noise reduction for one digit and two noises.

番下の制御作動後の波形では明らかに雑音が低減されて、数字音声が発音している。制御作動前後の数字音声の無音声区間に含まれている雑音成分から求めたNRLは帯域雑音の中心周波数が1kHzの時、27.2dBであった。

制御点での雑音低減を最大に保ったままにして、Fig.1に示した体積1m³の制御対象域内の点(x,y,z)でのNRLを求めた。座標(x,y,z)は各xyz軸について1mの長さを10分割した点である。更に、NRLが0以上の点をプロットして雑音制御可能域の体積を算出した。パラメータとした能動音源の角度 θ は0°から360°までの30°間隔とした。その計算結果をFig.4に示す。図より、 θ が0°の場合が最も有効雑音低減体積は大きく、0.78m³となっている。また θ が180°である制御点の反対側に近づくほどその値は減少している。また、FIRフィルタのタッ

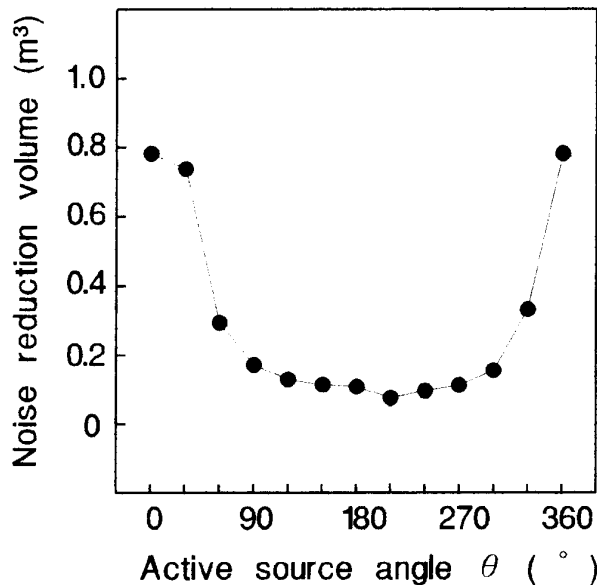


Fig.4 Effective noise reduction volume with the active noise direction.

プ数が64を下回ると、雑音検出性能も能動雑音低減性能も極端に劣化した。だからと言ってタップ数は大きければ良いとは限らない。タップ数が大きいと能動音源の設置位置に厳しい制限が生じ、場合によっては雑音低減ができなくなった。

4. まとめ

1) 音環境改善のための能動雑音制御の一つの試みとして、マイクロホンアレイを用いた雑音検出法を併用した方法を示した。本法では、雑音信号とその到来方向が検出できるので、能動雑音制御を効果的に実現できる。

2) 本法での能動雑音低減は、音源数、雑音検出フィルタのタップ数、音源と制御点の相互位置関係に依存し、制御可能域は制限される。

3) 1数字音声と2雑音の3音源場について能動雑音低減実験を行った結果、最大雑音低減レベルは f_0 が1kHzの時最大値27.2dBとなった。一方、雑音低減可能体積は f_0 が500Hzの時最大値0.78m³を示した。この値は f_0 が低いほど大きな値を示した。

参考文献

- 1) P.A.Nelson S.J.Eliot, "Active control of sound", Academic Press, (1992).
- 3) 安倍寛通、他、"マイクロホンアレイを用いた多音源音場での音源方向の推定"、信学技法 EA95-61, pp.31-36 (1995).
- 2) 黒岩和治、他、"マイクロホンアレイによる信号検出法を用いた能動騒音低減"、信学技法 EA97-75, pp.39-43 (1997).