バーチャル・マイク法アクティブ・ノイズ制御*
(適用条件に関する基礎的解析)松岡 真二^{*1}, 北川 孟^{*2}, 堀 畑 聡^{*3}
石光 俊介^{*4}, 田村 史雄^{*5}Active Noise Control using a Virtual Error Microphone System
(A Fundamental Study for Practical Application)Shinji MATUOKA, Hajime KITAGAWA, Satoshi HORIHATA,
Syunsuke ISHIMITU and Fumio TAMURA

A system for active noise control, ANC, uses a secondary speaker to cancel the sound pressure at an error microphone which is placed at a control position in the space. This conventional ANC creates a quiet zone, QZ, around the physical error microphone. However, the QZ becomes unstable if a small change occurs in the acoustic path from the secondary speaker to the error microphone. Recently, to create the QZ virtually and to expand it spatially, a new arrangement for ANC, called the 'virtual microphone system', has been proposed. In this study, some fundamental characteristics of the virtual microphone method are clarified by both computer simulation and experiment. The difference between the acoustic pressure at the physical error microphone and that at the virtual microphone is analyzed in a three-dimensional space, and the limiting condition to be satisfied in the system is obtained. The noise reduction level of the system is compared with that of the conventional system and it is clear that they coincide very well.

Key Words: Active Noise Control, Virtual Microphone Method, Quiet Zone, Three-Dimensional Space, Noise Reduction Level

1. 緒 言

アクティブ・ノイズ制御(ANC)は実用化段階に入りつつあるが, 多くの問題点も残されている。それらの一つに消音空間がエラーマイク(これは制御点すなわち騒音検出位置に設置したマイクをいう)近傍に限定されるという問題点があり, これを解決するためにバーチャルマイク法(以後, V-マイク法)の適用が新しく提案されている⁽¹⁾。バーチャルマイク(以後, V-マイク)とは, 空間内に配置されたマイク(フィジカルマイク, 以後, P-マイク)とは別の位置に仮想的に設置されたマイクのことである。この方法は, P-マイクを制御することにより V-マイク位置での ANC を行うものである。V-マイク法を利用すると, マイクやマイク増幅器等のハードウェアを拡張することなくエラーマイクを多チャンネルにすることができるが, この方法を適用するには ANC を行う前の音場が P-マイクと

V-マイクの位置でほぼ等しいことが前提となる。しかし現状では原理的な提案にとどまり, 両マイク間の音圧差および位相差に関する定量的な検討は行われていない。実用上は音場が完全に一致することはあり得ないので, V-マイク法を実システムに適用するためには音圧差および位相差の許容限界を把握する必要がある。また従来は主としてダクト等の一次元空間を制御対象として想定しており, 自動車の車内騒音低減等を目的としたより実用的な空間を対象とした研究はほとんどなされていない。

そこで本研究では, 三次元空間の騒音低減を目的とし, 直方体閉空間における実験およびシミュレーションにより V-マイク法の特性解明を試み, 実システムに適用可能な音場条件も調べた。さらにこの方法の有用性を確認するために, 実際にマイクを配置した通常の(1, 1, 1)系および(1, 1, 2)系の ANC システムの実験結果と本方法の結果とを比較した [(a, b, c) 系とは, ノイズスピーカ(N-スピーカ)を a 個, コントロールスピーカ(C-スピーカ)を b 個, エラーマイクを c 個, 使用したシステムを表す⁽²⁾⁽³⁾]。

2. V-マイク法 ANC の原理

本研究の ANC システムでは Filtered-x least -

* 原稿受付 1995 年 12 月 6 日。

^{*1} 学生員, 豊橋技術科学大学大学院 (〒441 豊橋市天伯町字雲雀ヶ丘 1-1) [現: 松下電器産業(株)]。^{*2} 正員, 豊橋技術科学大学。^{*3} 豊橋技術科学大学。^{*4} 正員, パイオニア(株) (〒350 川崎市山田西町 25-1)。^{*5} パイオニア(株)。

mean-square(Fx-LMS)アルゴリズムを用いた。その基本的な(1, 1, 1)系のブロック図を図1に示す。

まず信号処理アルゴリズムの概要を述べる。このアルゴリズムにおける誤差信号 $e(n)$ は式(1)および(2)で示される。

$$e(n) = d(n) + \sum_{j=0}^{J-1} C_j \cdot y(n-j) \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$y(n-j) = \sum_{i=0}^{N-1} h_i(n-j) x(n-i-j) \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 C_j は C-スピーカとエラーマイク間の伝達関数を j 個の次数で表したものである。出力 $y(n)$ は参照信号 $x(n)$ と $N-1$ 次の適応フィルタ(ADF)のフィルタ係数 h_i の畳み込みの和であり、 N は適応フィルタの次数である。式(1)の誤差信号 $e(n)$ の二乗を評価関数とし、最急降下法で最適フィルタ係数を算出する。係数 h_i は次式に従って更新される。

$$h_i(n+1) = h_i(n) - 2\mu E\{e(n)r(n-i)\} \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここで、

$$r(n-i) = \sum_{j=0}^{J-1} \bar{C}_j x(n-i-j) \quad \dots\dots\dots (4)$$

μ は収束係数で、収束速度と残留誤差を決定する重要なパラメータである。これは参照信号 $X(n)$ の平均エネルギーから求まるが、事前に決定することは困難であり一般的には実験的に決められる。また $\bar{C}_j$ は位相条件を十分に満たしたモデリング伝達関数で、C-スピーカとエラーマイク間の伝達特性をモデル化したものである⁽³⁾⁽⁴⁾。

V-マイク法では、V-マイクとP-マイクを図2のように配置し、それぞれのエラーマイクからの誤差信号は式(1)より

$$e_v(n) = d_v(n) + \sum_{j=0}^{J-1} C_{vj} \cdot y(n-j) \quad \dots\dots\dots (5)$$

$$e_p(n) = d_p(n) + \sum_{j=0}^{J-1} C_{pj} \cdot y(n-j) \quad \dots\dots\dots (6)$$

で表される。ここで、 $d_v(n)$ と $d_p(n)$ はそれぞれ V-マイクと P-マイクのマイク位置での所望信号、 C_{vj} と C_{pj} はそれぞれ C-スピーカから各エラーマイクまでの伝達関数、 $y(n)$ は式(2)によって得られる C-スピーカからの出力である。

Fig. 1 Block diagram of Fundamental Fx-LMS algorithm

一カからの出力である。

今、ANCを行う前の音場の所望信号が $d_v(n) \equiv d_p(n)$ であれば、式(5)および(6)から

$$e_v(n) \equiv e_p(n) - \sum_{j=0}^{J-1} (C_{pj} - C_{vj}) \cdot y(n-j) \quad \dots\dots\dots (7)$$

が得られる。

伝達関数 C_{vj} と C_{pj} 、出力 $y(n)$ および P-マイク位置での誤差信号 $e_p(n)$ 、が与えられると式(7)から V-マイク位置での誤差信号 $e_v(n)$ が算出される。本研究で用いた実験システムを図3に示す。信号発生器(図中の Signal Generator)からのノイズ信号を参照信号 $X(n)$ としてデジタル信号処理装置(Digital Signal Processor, 図中の DSP)へ入力する。DSP では、Fx-LMS アルゴリズムによって逐次フィルタ係数を更新し出力 $y(n)$ を C-スピーカへ入力する。三次元空間内に配置した P-マイクは、その位置での $d_p(n)$ と $y(n)$ の和を検出して誤差信号として DSP へ出力する。DSP では、式(7)に従って適応フィルタの係数を更新し、誤差信号 $e_v(n)$ を算出して V-マイク位置での消音を行う。

V-マイク法では、当然のことながら所望信号 $d_v(n)$ と $d_p(n)$ の振幅および位相の差が ANC の動作に直接影響を及ぼす。

Fig. 2 Block diagram of Fx-LMS algorithm for Virtual Microphone System

Fig. 3 ANC arrangement of Virtual Microphone System

3. 実験方法

3.1 モデル空間とノイズ信号 三次元空間内でのノイズ制御を行うために直方体のモデル空間を用いた。その寸法は、 x 方向が 145 cm, y 方向が 92 cm, z 方向が 65 cm である(図 4)。各辺の長さは、空間内の音が互いに共振しないように $\sqrt{5} : \sqrt{2} : 1$ の無理数の比とした。

V-マイク法の基本的性質を明らかにするために、ノイズ信号として、 x 軸の中点を節とする定在波を振動モードとする 120 Hz の正弦波を選択した。空間内でのこの信号音の音場を、図 5 に示す(z 軸方向は音圧である)。同図より、この信号は y 方向と z 方向では共振を生じないことがわかる(これは、図 4 の網掛けした xy 平面を 4 cm の正方形のメッシュに分割しその交点を観測点として測定したものである)。

3.2 C-スピーカ軸上のエラーマイクの配置位置の検討 まず $d_v(n)$ と $d_p(n)$ の振幅および位相の差が ANC の動作に与える影響を定量的に評価した。

ANC の効果を測定するための計測点として、図 4 に示すように、C-スピーカの中心を通る太い矢印の直線上に P-マイクと V-マイクを配置した。V-マイク法における最適なマイク配置位置を決定するために、この軸上でのエラーマイク位置におけるノイズの音圧と音源を基準とした位相差の変化を解析した。すなわち、この直線上に P-マイクを移動させ、120 Hz の正弦波音を N-スピーカから放射したときの P-マイク位置での音圧と音源を基準とした位相差の変動を解析した。その結果を図 6 と 7 に示す(これらの図では、C-スピーカ位置を原点にとった)。N-スピーカから放射された音の音圧と位相差は、それぞれ ± 1 dB および $\pm 10^\circ$ 以内の変動であった。特に、20 cm までの範囲と 40 cm 近傍および 60 cm 近傍の位相差はほぼ等しかった。この結果を参考に、P-マイクを 20 cm の位置に、V-マイクを 40 cm と 60 cm の位置のいずれかに、配置することにした(V-マイク法 ANC では、その効果を上げるため、通常 C-スピーカに近いほうに P-マイクを配置する)。すなわち図 8 に示す配置での消音効果

Fig. 4 Rectangular Box for the analysis of three-dimensional acoustic field

Fig. 5 Calculated Sound Field generated by the Noise Signal

Fig. 6 Amplitude fluctuation along an axis perpendicular to the Control Speaker

Fig. 7 Phase fluctuation along an axis perpendicular to the Control Speaker

Fig. 8 Arrangement of Physical and Virtual Microphones in the box

を解析した。

本解析では、サンプリング周波数 2 kHz およびカットオフ周波数 500 Hz でノイズ信号 120 Hz をサンプリングし、適応フィルタの次数 (N) 16, モデリング伝達関数の次数 (j) 32 およびステップサイズ (μ) 0.001 の値をパラメータとして設定した Fx-LMS システムにて信号処理を行っている。ここで $\mu=0.001$ は、実験的に求めた最適収束係数である。

本研究では、Elliott らが用いた基準を参考に⁽¹⁾, ANC 前後の音圧の差が -10 dB 以下であれば消音効果があつたもの、と判定した。

4. 実験結果

4.1 シミュレーションによる最適 V-マイク位置の選択 40 cm, 60 cm のいずれが V-マイク位置として最適であるかを選択する目的で、図 8 における P-マイク・V₄₀-マイク系と P-マイク・V₆₀-マイク系にて V-マイク法 ANC を行い、消音効果をシミュレーションによって比較した (V₄₀-マイクは 40 cm 位置に、V₆₀-マイクは 60 cm 位置に、それぞれ V-マイクを配置したシステムを表す)。この場合、C-スピーカ・エラーマイク間の伝達関数は実測値を用いた。これらの解析では、音圧分布を、V-マイク位置での伝達関数を C-スピーカ中心軸上の各点での実測値で補正して算出している。すなわち軸上の 4 cm 間隔位置での伝達関数を実測し、それと V-マイク位置での値を畳み込み積分し式 (7) を補正した。その結果を図 9 に示す。この図より、60 cm 位置のほうが消音効果が大きく、また C-スピーカ軸上における -10 dB 以下の消音空間の広がりも大きいことがわかる。その理由は、図 6 と 7 から (1) N-スピーカから放射される音の音圧、位相差ともに 60 cm 位置近傍のほうがより安定していること、(2) P-マイク位置と V₄₀-マイク位置との音圧と位相差の違いはそれぞれ 0.9 dB, 5.6° であるのに対し、P-マイク位置と V₆₀-マイク位置でのそれらは 0.3 dB,

Fig. 9 Sound Pressure fluctuation along an axis perpendicular to the Control Speaker, obtained by simulated Virtual Microphone System

2.6° でありより P-マイク位置の音場に近いくこと、等が考えられる。

以上の結果を参考に、最適 V-マイク位置を V₆₀-マイク位置として解析を行った。

4.2 V-マイク法 ANC の適用が可能な音場条件

V-マイク法 ANC を適用するには、V-マイクと P-マイクで測定される所望信号の特性が近似的に等しくなければならないが⁽¹⁾, それらに関する定量的な検討は今までになされていない。そこで、本実験での両マイク位置におけるノイズ信号の音圧差と位相差の限界をシミュレーションによって評価した。

P-マイク位置と V₆₀-マイク位置で測定される所望信号に関して、(1) 位相が等しく音圧差が変化した場合と (2) 音圧差が等しく位相を変化した場合、について解析した。今まで同様に 120 Hz の正弦波信号を所望信号とし、C-スピーカからの伝達関数は実測値を用いた。(1) の条件での解析結果を図 10 に、(2) の条件での解析結果を図 11 に示す。図 10 では、位相差を 0°, 5°, 15° の 3 水準に、図 11 では、音圧差を 0 dB, 1 dB, 3 dB の 3 水準に変えた。-10 dB 以下という所望の消音効果を得るためには、図 10 から「位相差 0° と 5° の場合音圧差が 3 dB 以内、位相差 15° の場合音圧差が 2 dB 以内」、図 11 から「音圧差が 0 dB と 1 dB の場合位相差が 18° 以内、音圧差が 3 dB の場合位相差が 9° 以内」という適用限界の基準が得られた。

4.3 V-マイク法 ANC と従来法および実測値との比較

4.3.1 V-マイク法 ANC と (1, 1, 1) 系 ANC との比較 および V-マイク法 ANC におけるシミュレーション結果と実測値の比較 P-マイク・V₆₀-マイク

Fig. 10 Relation between Noise Reduction and Sound Pressure in simulated Virtual Microphone System (Phase Difference is constant)

Fig. 11 Relation between Phase Difference and Sound Pressure in simulated Virtual Microphone System (Sound Pressure is constant)

系 ANC の実験結果と、実際に 60 cm 位置に P-マイク配置した (1, 1, 1) 系のそれを比較した結果を図 12 に示す。V-マイク法の値は、C-スピーカ中心軸上で 4 cm 間隔の各点に配置した P-マイクにて実測した音圧である。(1, 1, 1) 系 ANC の値は、P-マイクを 60 cm 位置に配置して ANC を行い、そのときの同じ軸上の音圧分布を同間隔で実測したものである。両分布はおおむね一致するが、60 cm 位置における局所的な ANC の効果は (1, 1, 1) 系のほうが 2 けた程度大きい。しかしながら実測した V-マイク法 ANC においても約 -20 dB であり、-10 dB 以下という基準は十分満足している。

図 13 は P-マイク・V₆₀-マイク系 ANC の実測値とシミュレーション結果を比較したものである。シミュレーションの値(同図中の鎖線)は図 9 のそれと、実測値は図 12 のそれと、それぞれ同じである。両分布を比較すると、-10 dB 以下の範囲は実測値のほうが大き

Fig. 12 Comparison between measured Noise Reduction of Virtual Microphone System and that of a conventional Fx-LMS ANC system, obtained by case (1, 1, 1)

Fig. 13 Comparison between measured and simulated Noise Reductions of case (1, 1, 1) Virtual Microphone System

く、局所的な効果はシミュレーション結果のほうが大きく表現されている。このことから、本研究におけるシミュレーションでは局所的な効果が強調される傾向にあることがわかる。

4.3.2 (1, 1, 2) 系への V-マイク法 ANC の適用

(1, 1, 2) 系とは、ANC における消音領域 (Quiet Zone, QZ) 拡大の目的でエラーマイクを 2 個用い、両マイクからのエラー信号の和を最小になるように適応させたシステムである。

図 14 は、P-マイクを 2 個用いた通常の (1, 1, 2) 系 ANC の効果と V-マイク法による ANC のそれを比較した結果である。(1, 1, 2) 系の V-マイク法 ANC の P-マイクの機能は 60 cm 位置の V-マイクの制御に加えて、P-マイク自身で 20 cm 位置の ANC も行い両マイクからのエラー信号の和を最小にするように適応さ

Fig. 14 Comparison between measured Noise Reduction of Virtual Microphone System and that of a conventional Fx-LMS ANC system, obtained by case (1, 1, 2)

せている。

同図から、両システムによって得られる効果は極めてよく一致していることがわかる。 -10 dB以下の範囲は 20 cm 位置、すなわち P-マイク位置の方に広がり、またこの位置近傍の方が音圧レベルは下がり、この場合も (1, 1, 1) 系と同様に、P-マイクの効果の方がより大きく表れている。

このように V-マイク法 ANC は (1, 1, 2) 系へ拡張することも可能であり、通常の (1, 1, 2) 系 ANC と同等の効果が得られることが明らかになった。

5. 結 言

本研究では、V-マイク法 ANC の実用化を目的とし、この方法の定量的な基礎解析を行った。すなわちより実用性のある三次元での V-マイク ANC の実現を目的に、音場としては Elliott らと同様、純音 (Pure-tone, 単一周波数の正弦波) を制御対象としてその基本的性質の解明を行った。

まず、計算機シミュレーションにより V-マイク位置で -10 dB 以下のノイズ低減効果が得られる条件と

して、

(1) 音圧差に関しては「 1 dB 以内ならば位相差が 18° 以内、 3 dB では位相差が 9° 以内」

(2) 位相差に関しては「 5° 以内ならば音圧差が 3 dB 以内、 15° では音圧差が 2 dB 以内」が得られた。

計算機シミュレーション結果の妥当性を確認するため、直方体三次元空間での実験と比較し以下の結論が得られた。

(1) (1, 1, 1) 系 ANC での実測結果との比較では、C-スピーカ軸上の音圧分布は相互にほぼ一致し V-マイク法の有効性が確認できた。すなわち V-マイクを音圧と位相に関する上記の境界条件内で用いることにより有効なノイズの低減効果が実現可能である。

(2) マイク数を増やさず QZ 拡張が可能性かどうかを検討する目的で、P-マイクを 2 個使用する通常の (1, 1, 2) 系 ANC と、それらのマイク位置に P-、および V-マイクを配置した場合の V-マイク法 ANC とを比較した。その結果 1 個の P-マイクのみ V-マイク法 ANC により、P-マイクを 2 個使用する通常の (1, 1, 2) 系 ANC と同様の QZ 拡大効果が得られることがわかった。

V-マイク法 ANC は新しい方法であり、その実用性、拡張性に関しても大きな発展が予想される。今後は、非定常ノイズの低減等、より実用的な分野への研究を進める予定である。

文 献

- (1) Elliott, S. J. and David, A., A Virtual Microphone Arrangement for Local Active Sound Control., *Paper presented at 1st Int. Conf. Motion and Vibration Control (Session: Control of Sound I)*, (1992), 1027-1031, Yokohama, September.
- (2) 江口正樹・ほか 2 名, 機械力学・計測制御講演論文集 (Vol. B), (1993), 157-161.
- (3) 松岡真二・ほか 4 名, 日本機械学会第 72 期通常総会講演会講演論文集 (I), (1995), 537-538.
- (4) 中路義晴・ほか 2 名, 第 2 回運動と振動の制御シンポジウム講演論文集, (1991), 301-306.