119 評価点が移動する3次元能動的音響制御
(フィルタマップを用いた制御法)Active Noise Control with Moving Evaluation Point in 3 Dimensional Acoustic Field
(The Method using Filter Map)○正 池田生馬 (九大院, JSPS 特別研究員 DC), 正 雫本信哉 (九大),
正 松田浩一 (九大), 正 木庭洋介 (九大)Ikuma IKEDA, Kyushu University, 744 Motoooka Nishi-ku Fukuoka-shi, Fukuoka
Shinya KIJIMOTO, Kyushu University
Koichi MATSUDA, Kyushu University
Yosuke KOBAYASHI, Kyushu University

On active noise control in 3-dimensional acoustic field, a control effect becomes worse when an evaluation point moves. Against this problem, we proposed control with filter map. In this algorithm, a control area is divided into small grids. Effectiveness of this algorithm was shown in simulations. In this paper, the validity of this algorithm is shown in several simulations and experiments in the anechoic chamber. The evaluation point moves 0.4m at the speed of 0.45m/s in experiment. A CCD camera catches a position of the point. From the experimental results, it is shown that the effectiveness of the proposed algorithm is 10dB more than the that of the direct adaptive algorithm.

Key words : Active Noise Control, Direct Adaptive Algorithm, LMS Algorithm, Moving Evaluation Point, Filter Map

1 緒言

能動的音響制御 (Active Noise Control, ANC) に用いられる適応アルゴリズムとして, Filtered- x LMS アルゴリズム [1] がある. このアルゴリズムは非常に簡便で安定性も高く有用である. しかしこのアルゴリズムには制御音源から誤差マイク (評価点) までの音響特性 (二次経路特性) の事前同定が必要であるという問題と, 二次経路特性を時不変と見なしていることから, 二次経路特性が変化すると制御が不可能となる問題がある.

これらの問題に対して直接法 (Direct Adaptive Algorithm, DAA) が佐野らによって提案されている [2]. 図1が直接法のブロック線図である. このアルゴリズムは制御と同時に二次経路特性をフィルタ K が適応的に同定するアルゴリズムである. そのため, Filtered- x LMS アルゴリズムに必要な二次経路特性の事前同定が不要で, 評価点が移動する場合の二次経路特性の変化にも追従することができる. しかし適応フィルタの更新は LMS アルゴリズムで行われており, 適応速度が十分ではないために評価点が移動する際には制御効果が大きく劣化するという問題がある.

著者らは3次元音場を対象として評価点の移動に伴う問題について検討を行っており, フィルタマップによる制御を提案している [3][4]. 提案法は直接法をベースとしているため, 音響特性の事前同定が必要なく, 初期収束

性も良好であるという特徴も持っている. 著者らはこれまでに数値シミュレーションによって有効性を検討してきた. 本論文では数値シミュレーションによって提案法の有効性を示した後に, 実験によって提案法の有効性を検討する.

2 フィルタマップによる制御法

まずフィルタマップについて説明する. 制御系の特性である適応フィルタを制御中に適宜, 制御系内に保存する. 制御対象領域を格子状に分割し, 各格子点座標と保

Fig 1: Block diagram of Direct Adaptive Algorithm

存した制御系特性を対応付けることで (マッピング), 必要に応じてデータを参照し, 使用することを可能にしたものをフィルタマップと呼んでいる. フィルタマップによる制御とは, 評価点が移動する際に評価点を囲む近傍4点に保存されたマップ情報から線形補間によって評価点位置におけるフィルタを内挿し, 騒音制御を行うものである. 本手法は格子点数と適応フィルタのフィルタ長に応じてメモリ領域が必要となるため, メモリ使用量と演算量が増大するという問題があるものの, 評価点が繰り返し移動する場合に有効であることが示されている.

格子点にフィルタを保存する時に, 著者らが提案している幾何学的調整法 [5] を用いる. この手法は騒音と制御音の距離減衰と時間遅れを考慮しフィルタを調整する方法である. 格子点 (m, n) のフィルタ更新式は

$$\begin{aligned} C_{(m,n)} &= a_{dC} C_s * h_C \\ D_{(m,n)} &= a_{dD} D_s * h_D \\ K_{(m,n)} &= a_{dK} K_s * h_K \end{aligned} \quad (1)$$

である. 式 (1) 中の a_d は距離減衰係数, h は時間遅れフィルタ, C , D および K はそれぞれ図1に示す直接法内の適応フィルタ, 添字 s は更新基準点におけるフィルタであることを表し, 添字 C , D , K はそれぞれフィルタ C , D および K に対応するものであることを表している.

次に更新基準点の選択方法について説明する. 図2中の Move1 に示すように, 評価点が格子 (m, n) 内を移動

Fig 2: Movement inside a grid (Move1) and movement out the grid (Move2)

Fig 3: Device arrangement in anechoic chamber

している間, フィルタ D の出力・推定所望信号 $\hat{d}$ と誤差マイク出力信号 e から

$$E_{(m,n)} = \frac{\sum \hat{d}^2}{\sum e^2} \quad (2)$$

によって制御効果 E を制御中に推定する. その後, 図2中の Move2 に示すように, 評価点が他の格子に移動した場合に, 格子 (m, n) での制御効果として $E_{(m,n)}$ を保存する.

マップを更新する際に, 格子点 (m', n') と更新される点の距離 l と正定数 a から

$$\hat{E}_{(m',n')} = E_{(m',n')} \frac{a}{l+a} \quad (3)$$

によって, 格子点 (m', n') を更新基準点とした場合に行えることができる制御効果 $\hat{E}_{(m',n')}$ を推定し, $\text{Max}(\hat{E}_{(m',n')})$ を与える点 (m', n') を更新基準点とする. ここで式 (3) は $l=0$ で $\hat{E}_{(m',n')} = E_{(m',n')}$ となり, $l \rightarrow \infty$ で $\hat{E}_{(m',n')} \rightarrow 0$ とするために決めた関数形であり, a は $E_{(m',n')}$ の劣化していく度合いを決定する正定数である.

3 シミュレーションによる有効性検証

数値シミュレーションによる提案法の有効性を示す. シミュレーションで用いる音響特性は, 無響室内に図3に示すように機器を配置し, 1024 長の FIR フィルタとして測定したものとする. 音響特性測定条件を表1に示す.

シミュレーション条件を表2に示す. 本シミュレーションには, 実験において評価点の位置情報を取得するために使用する CCD カメラのサンプリング周波数 (30Hz) を考慮している. 評価点はシミュレーション開始 10 秒後から 5 秒間隔で, 0.45m/s の等速直線運動を開始するものとし, 移動経路は図3の点 A と点 B の2点間の往復移動とする. 制御効果を表す指標として

$$EE_k = 10 \log_{10} \left(\frac{\sum_{i=k-511}^k e_i^2}{\sum_{i=k-511}^k d_i^2} \right) [\text{dB}] \quad (4)$$

で算出する推定誤差 EE を用いる. この指標は所望信号に対して誤差信号がどれほど小さくなったかを示す指標

Table 1: Conditions of measuring acoustic properties

Temperature	297 - 300K
Sampling frequency	10 kHz
Input signal	White noise
Measurement time	30 sec

であり、負で小さいほど制御効果が高く、正になることで騒音が制御前よりも悪化した状態であることを表す。

シミュレーション結果を図 4 に示す。比較のために Filtered- x LMS アルゴリズムと直接法によるシミュレーション結果も記載している。図 4 中の上部に評価点の停止している点を表示しており、灰色で網掛けした時間に評価点が移動している。Filtered- x LMS アルゴリズムによる制御では初期収束性が他のアルゴリズムに対して高速だが、評価点が移動を行った直後から大きく制御効果が劣化し、制御が不可能となっている。直接法による制御では初期収束性に関しては Filtered- x LMS アルゴリズムよりも遅いが、評価点が移動しても持続的な制御が可能であることが分かる。しかし評価点が移動している間には制御効果が劣化している。フィルタマップは直接法をベースとしているため、初期収束性については直接法と同等である。評価点の移動に対しては、直接法に見られる制御効果の劣化を抑制し、移動中には 5dB 程度高い制御効果を得ることが出来ることが分かる。

Table 2: Conditions of ANC simulation

Sampling frequency of ANC	10 kHz
Sampling frequency of CCD camera	30 Hz
Input signal	White noise
Length of adaptive filters	256
Step size parameter for C	0.02
Step size parameter for D	0.20
Step size parameter for K	0.80
Speed of movement	0.45 m/s
Time of starting movement	10, 15, 20, 25 sec

Fig 4: Comparison of Filtered- x LMS algorithm, Direct Adaptive Algorithm and Filter map in simulation

4 実験による有効性検証

実験によって提案法の有効性を検証する。製作した実験装置の写真を図 5 に示す。評価点の移動は DC モータを用いたワイヤー駆動で行う。ただし本実験での評価点の移動は、移動開始時刻はシミュレーションと同様だが、速度制御や位置制御などは行っていないため、等速直線運動を行うシミュレーションとは移動速度が異なる。実験装置上部に取り付けたサンプリング周波数 30Hz の CCD カメラで得た画像から評価点の位置を得る。その他の条件は表 3 に示す。3 系統の白色雑音を用い、それぞれについて 3 回ずつ実験を行う。

実験結果を図 6 に示す。図 6 上段は実験中、カメラで得られた評価点の座標を表し、下段は計 9 回の実験で得た制御効果を平均化した値を記載している。図 6 から、直接法では移動開始直後から制御効果が大きく劣化し、移動中には制御前よりも騒音が悪化した状態であることが分かる。一方、フィルタマップによる制御では移動開始直後の制御効果の劣化を抑制し、移動中においても直接法より 10dB 程度高い制御効果を得ることが出来る。しか

Fig 5: Experimental equipment

Table 3: Conditions of ANC experiment

Sampling frequency of ANC	10 kHz
Sampling frequency of CCD camera	30 Hz
Input signal	White noise
Length of adaptive filters	256
Step size parameter for C	0.01
Step size parameter for D	0.01
Step size parameter for K	0.01
Time mean speed of movement	0.45 m/s
Time of starting movement	10, 15, 20, 25 sec

し移動終了後に制御効果が劣化してから回復するという、シミュレーション結果とは異なる傾向が見られる。説明のために図6中、制御効果が劣化し始める時刻に線を引いた。その時刻に評価点が0.01m程度移動していることが図6上段から分かる。このことから大きく移動を行った後に、適応フィルタが十分収束する時間を与えられず再び移動を行うことによって、その後の収束性が悪化したと考えられる。

5 結言

本論文では3次元音場における能動的音響制御において、評価点が移動することによる制御効果の劣化についての検討を行った。無響室内の音響特性を用いた数値シミュレーションおよび無響室内における実験によって、著者らが提案しているフィルタマップによる制御の有効性を検証し、以下の結果を得た。

1. 直接法に見られる移動開始直後の制御効果の劣化を抑制できた。
2. 評価点の移動中には直接法よりも、シミュレーションでは5dB程度、実験では10dB程度高い制御効果を得ることができた。
3. 提案法を用いた実験では移動終了後に制御効果が劣化してから、再び回復するという現象が見られた。

Fig 6: Comparison of Direct Adaptive Algorithm and Filter map in experiment

今後は実験に見られる移動終了後の制御効果の劣化についての詳しい原因を探索する。それに併せてフィルタマップを実装するために必要なメモリおよび演算量を軽減する手法を検討する。

参考文献

- [1] Simon Haykin, "Adaptive Filter Theory", Prentice-Hall, Inc. A Simon & Scuster Company, 1996
- [2] Khono, T., Ohta, Y. and Sano, A., "Adaptive Active Noise Control Algorithm without Explicit Identification of Secondary Path Dynamics", *The Transactions of The Institute of Electronics, Information and Communication Engineers A*, vol. J86-A, No. 1, pp. 9-18, 2003
- [3] Ikeda, I., Kijimoto, S., Matsuda, K. and Koba, Y., "Active Noise Control with a Moving Evaluation Point", *Journal of System Design and Dynamics Special Issue on The Twelfth Asia Pacific Vibration Conference (APVC2007)*, Vol. 2, No. 1, pp. 362-369, 2008
- [4] Ikeda, I., Kijimoto, S., Matsuda, K., Koba, Y. and Keitaro, K., "Filter-Map Updating Algorithm for 3-Dimensional Active Noise Control", *Proceedings of the 37th International Congress & Exhibition on Noise Control Engineering (Inter. Noise 2008, CD-ROM)*, No. 0311, 2008
- [5] Ikeda, I., Kijimoto, S., Matsuda, K., Koba, Y. and Higashi, T., "Active Noise Control Assuming Quiet Zone Move", *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers. C*, Vol. 74, No. 741, pp. 1273-1280, 2008