評価点の位置情報を利用した3次元能動的音響制御*

池田生馬^{*1}, 雉本信哉^{*2}, 松田浩一^{*2}
木庭洋介^{*1}, 景山慶太郎^{*3}Active Noise Control Using Geometrical Information of
an Evaluation PointIkuma IKEDA^{*4}, Shinya KIJIMOTO, Koichi MATSUDA,
Yosuke KOBAYASHI and Keitaro KAGEYAMA^{*4} Department of Intelligent Machinery and Systems, Kyushu University,
744 Motooka, Nishi-ku, Fukuoka-shi, Fukuoka, 819-0395 Japan

Active noise control (ANC) in a three-dimensional sound field (*e.g.*, in an office) is investigated in this paper. Since the size of the controlled area generally depends on the wavelength of the target noise, it is difficult to control the noise in a whole room using ANC. Instead, noise control method in the vicinity of a subject's head (referred to *around-head control*) is investigated in this paper. To realize around-head control, an evaluation point that mimics head movement is required. However, movement of the evaluation point during control has not been considered in conventional ANC. Authors have proposed control with filter map in order to solve this problem. In this method, the controlled space is subdivided into small grids. A filter map is produced by storing and updating filters in each grid. A new method for updating the map is proposed in this paper. A reliability index is calculated and used in this updating method. The effectiveness of proposed method is shown by numerical simulations using acoustic properties measured in an anechoic chamber.

Key Words: Noise Control, Digital Control, Filter, Adaptive Control, Direct Adaptive Algorithm, Moving Evaluation Point, Time-Delay, Distance-Attenuation

1. 緒 言

騒音は代表的な公害であり低減のための研究が多くなされている。騒音を低減させる手法として消音器や防音材などを用い騒音を減衰させる受動的音響制御と、音の干渉を利用し騒音を打ち消す能動的音響制御(Active Noise Control, ANC)がある。受動的音響制御は主に中・高音域、ANCは主に低音域において効果を発揮する。そのため、これらの手法を組み合わせることで広い周波数範囲で高い制御効果を出すことが可能になると考えられる。しかし3次元空間内におけるANCでは、任意点における制御が可能であるものの、制御領域の大きさが騒音の波長によって定まるので、簡易な機器構成では空間全体を制御することが困難である。そこで著者らは、ANCのハードウェア構成として人の頭部近傍に誤差マイク(評価点)を設置しその周囲を消音する方法を採用している。

一方、ソフトウェアの観点から、ANCの適応アルゴリズムとしてFiltered- x LMSアルゴリズム⁽¹⁾が広く一般に用いられている。このアルゴリズムは簡単に非常に安定性が高く有用である。しかし制御音源から誤差マイクまでの音響特性(二次経路特性)を事前にFIRフィルタとして同定し、制御器内に組み込む必要がある。さらに、二次経路特性を時不変として扱っているため、モデル化した二次経路特性を更新する機構を持っていない。そのため、評価点の移動などにより実際の二次経路特性が変化しモデル化誤差が大きくなると制御が行えなくなるという問題がある。

佐野らによって提案された直接法(Direct Adaptive Algorithm, DAA)⁽²⁾は制御と同時に二次経路特性を適応的に同定するアルゴリズムである。そのため、Filtered- x LMSアルゴリズムで必要な事前同定が不要で、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。評価点の移動に伴う制御効果の劣化に関して、飯田らによって1次元音

* 原稿受付 2008年9月22日。

^{*1} 正員, 九州大学大学院工学府知能機械システム専攻(〒819-0395 福岡市西区元岡744)。^{*2} 正員, 九州大学大学院工学府知能機械システム部門。^{*3} 准員, 九州大学大学院工学府知能機械システム専攻。

E-mail: ikuma@sky.mech.kyushu-u.ac.jp

場における ANC で評価点が移動する場合に、フィルタの更新を時間遅れ特性と主特性に分けて行う時間遅れ分離法が提案されている⁽³⁾。同じく1次元音場を対象としたものに、宇津野らの伝達関数補間法⁽⁴⁾がある。これらの方法を適用することで評価点の移動に対して制御を追従ができるという報告がされている。しかし、どちらも二次経路特性の事前同定が必要な方法であり、さらに1次元音場を対象としていることから、3次元音場に関する検討が不足している。

著者らは3次元音場内で評価点が移動する場合の ANC に適用可能な手法について検討を行っており、現在までに直接法に時間遅れ分離法を適用した、時間遅れおよび距離減衰をフィルタ更新に用いる幾何学的調整法⁽⁵⁾および幾何学的調整法を利用する制御方法であるフィルタマップによる制御⁽⁶⁾を提案した。本論文ではフィルタマップによる制御において課題であった、フィルタマップの更新方法を新たに提案し、シミュレーションによってその有効性を検討する。

2. 直接法・幾何学的調整法

直接法のブロック線図を図1に示す。このアルゴリズムは制御器内部の仮想誤差信号 e_1 および e_2 を最小にするように、3つの適応フィルタ C 、 D および K を更新する。ブロック線図および適応則から3つの適応フィルタはそれぞれ

$$\begin{aligned} C &= -\frac{W}{W_{ref}G} \\ D &= -\frac{W}{W_{ref}} \\ K &= G \end{aligned} \quad (1)$$

に収束することが分かる。フィルタ C は制御信号 u を出力し、フィルタ D は制御器内部において所望信号 d を推定する。フィルタ K が制御中に二次経路特性 G を適応的に同定するので、 G の事前同定が不要であり、 G の変動にもある程度の追従性を示す。しかし、評価点が移動する場合のように大きな変動がある場合に対しては適応速度が不足し制御効果が大きく劣化する。

この問題に対して著者らは幾何学的調整法を提案している。幾何学的調整法の更新式は

$$\begin{aligned} C_{k+1} &= a_{dC} (C_s * h_C) - 2\gamma_C e_1 s_k \\ D_{k+1} &= a_{dD} (D_s * h_D) - 2\gamma_D e_2 r_k \\ K_{k+1} &= a_{dK} (K_s * h_K) + 2\gamma_K e_2 u_k \end{aligned} \quad (2)$$

である。ここで添字 k はサンプル時間、添字 C, D および K はそれぞれのフィルタに対するものを示し、添字 s は移動開始点で十分収束したフィルタであることを示している。右辺第一項は位置の関数である。 a_d は距離減衰係数、 h は時間遅れフィルタであり、騒音源座標、二次音源座標、評価点座標、移動開始点座標および音速から計算される。右辺第二項は正規化 LMS アルゴリズムによる更新項であり、 γ は正規化 LMS アルゴリズムによるステップサイズパラメータである。幾何学的調整法による制御効果をシミュレーションで確認する。シミュレーション条件は4章におけるシミュレーション条件(表2)と同様とし、移動経路は4章・図7で示す点 A から点 C への移動である。また本論文では制御効果を表す指標として

$$EE = 10 \log_{10} \left(\frac{\sum_{i=k-511}^k e_i^2}{\sum_{i=k-511}^k d_i^2} \right) [\text{dB}] \quad (3)$$

で表される推定誤差を用いる。これは負で小さいほど制御効果が高く、0 で効果無し、正では制御前よりも騒音が悪化した状態であることを示す指標である。

シミュレーション結果を図2に示す。比較として Filtered- x LMS アルゴリズムによる制御結果および直接法による制御結果も示している。図中、灰色で網掛けした時間で評価点が移動しており、図の上部に評価点が停止している点を表記している。図2から Filtered- x LMS アルゴリズムでは、0 ~ 10 秒では他の2つの方法よりも優れた収束速度および制御効果を得ているが、10 秒経過後からは評価点の移動に全く対応できず発散している。直接法では持続的な制御は可能なものの、

Fig. 1 Block diagram of DAA

移動中には制御効果が大きく劣化していることが分かる。一方、幾何学的調整法では、直接法に見られる評価点移動直後の制御効果の大きな劣化を抑制できている。さらに移動終了後には直接法よりも高速に制御効果を回復している。しかし移動に伴い徐々に制御効果が劣化していることも分かる。

3. フィルタマップによる制御・マップ更新方法

幾何学的調整法の問題に対応するため、フィルタマップによる制御⁽⁶⁾を適用する。フィルタマップによる制御はまず制御空間(制御対象領域)を格子状に分割し、各格子点にフィルタを保存することでマップを作成する。そして、評価点が移動する際には、評価点位置におけるフィルタを評価点を囲む近傍4点に保存されたマップ情報から線形補間によって内挿し、騒音制御を行う手法である。まず1回の移動における、フィルタマップによる制御と幾何学的調整法の制御効果の比較をシミュレーションによって行う。シミュレーション条件などは表2と同一とする。シミュレーション結果を図3に示す。図3から、移動直後である10~11秒に

Fig. 2 Control effect by Filtered- x LMS, DAA or Geometrical Adjustment

Fig. 3 Control effect by Geometrical Adjustment or Filter-Map

はフィルタマップによる制御の方が制御効果が若干劣化するが、11秒以降の性能は同等であることから1回の移動ではほぼ同程度の性能であることが分かる。ただし評価点が複数回移動する場合には、幾何学的調整法ではこれ以上の制御効果を得ることができないのに対して、フィルタマップによる制御では移動に伴ってマップを更新するため、適切な更新を行えばさらに高い制御効果を得ることが可能である。本論文では、移動中に制御効果を推定することでマップ信頼度を算出し、その値を用いるマップ更新方法について提案する。

格子点 (m, n) を更新する更新式は

$$\begin{aligned} C_{(m,n)p} &= \beta C_{(m,n)p-1} + (1-\beta) a_{dC} (C_s * h_C) \\ D_{(m,n)p} &= \beta D_{(m,n)p-1} + (1-\beta) a_{dD} (D_s * h_D) \\ K_{(m,n)p} &= \beta K_{(m,n)p-1} + (1-\beta) a_{dK} (K_s * h_K) \end{aligned} \quad (4)$$

である。添字 p は通過回数を示している。右辺第一項がマップ情報を引き継ぐ項で、右辺第二項が更新基準点を移動開始点とする幾何学的調整法による更新項である。右辺第一項と右辺第二項、それぞれの更新への寄与率をマップ信頼度 β ($0 \leq \beta \leq 1$) によって決定している。

次にマップ信頼度の算出方法を説明する。図4に示すように、評価点が (m, n) , $(m+1, n)$, $(m, n+1)$, $(m+1, n+1)$ で囲まれる領域 (m, n) 内において移動している場合(図中 move1)をまず考える。フィルタ D の出力 $\hat{d}$ 、領域 (m, n) 内を移動している間のサンプリング数を r として

$$\bar{\alpha} = \sum_{i=k-r+1}^k \left(\frac{e_i^2}{\hat{d}_i^2} \right) \quad (5)$$

で領域 (m, n) の平均制御効果を算出する。そして評価点が領域を超えた場合(図中 move2)に、領域 (m, n)

Fig. 4 Moving the evaluating point in area (m, n) and over the area

の信頼度として

$$\beta_{(m,n)} = 1 - \bar{\alpha} \quad (6)$$

によって算出したマップ信頼度 $\beta_{(m,n)}$ を保存し、次の領域通過時にマップ更新式 (4) で用いる。ただし式 (6) において β が負になる場合は、誤差信号 e が推定された所望信号 $\hat{d}$ を上回っていることになるので、 $\beta_{(m,n)} = 0$ とする。

以上がマップ更新方法である。次章から数値シミュレーションによって有効性を検討する。

4. 評価点移動シミュレーション

本章では、前章で記述したマップ更新方法の有効性を数値シミュレーションを用い、数種類の移動パターンに関して検証する。

シミュレーションに用いる音響特性は無響室内において図5のように、測定機器を配置し、表1に示す条件で測定したものをを用いる。図中には座標軸も記載している。各シミュレーションにおける主な条件を表2に示す。本手法ではマップ更新およびマップ情報の利用に評価点位置情報が必要となることから、位置情報取得のためのデバイスが必要となる。本論文ではCCDカメラによる位置情報の取得を仮定しているため、カ

Fig. 5 Measurement arrangement in an anechoic chamber

Table 1 Conditions of measuring acoustic characteristics

Temperature	297~300K
Used algorithm	Normalized LMS
Weight coefficient	0.01
Measuring time	30sec
Sampling frequency	10kHz
Filter length	512
Input signal	White noise

メラのサンプリング周波数によって制御効果が異なることが予想される。

そこで、シミュレーションに考慮するカメラのサンプリング周波数 F_c をそれほど高速なタイプではない CCD カメラの動作周波数である $F_c = 20\text{Hz}$ とした場合と、ANC と同じサンプリング周波数である $F_c = 10\text{kHz}$ で動作させた場合の制御効果の違いをシミュレーションで確認する。シミュレーション結果 (図6) から $F_c = 10\text{kHz}$ の方が、評価点の移動を確実に捉えられるために、制御効果の劣化抑制効果が高いことが分かる。しかし移動速度が $v = 0.267\text{m/s}$ であることから、 $F_c = 20\text{Hz}$ の設定であってもカメラのサンプリング間隔に進む距離 ($v/F_c = 0.013\text{m/sample}$) はマップ格子間隔の半分程度である点、シミュレーション結果で、ある程度の制御効果が見られる点および計算時間の短縮という点から本論文では $F_c = 20\text{Hz}$ とする。

4.1 2点間の往復移動 評価点を図7に示した点Aと点Cの間を往復移動させた場合 (移動経路1: $A \rightarrow C \rightarrow A \rightarrow C \rightarrow A$) のシミュレーション結果を図

Table 2 Conditions of ANC simulations

Temperature	297K
Weight coefficient for C	0.3×10^{-3}
Weight coefficient for D	0.2×10^{-3}
Weight coefficient for K	0.5×10^{-3}
Adaptive filter length	256
Sampling frequency of ANC	10kHz
Input signal (noise)	White noise
Velocity of movement	0.267m/s
Grid size	0.02m
Start time of movement	10, 15, 20, 25sec

Fig. 6 Difference of sampling frequency of CCD camera F_c

8に示す。図には比較として直接法による制御結果も記載している。

直接法と比較して、移動開始直後の大きな制御効果の劣化を提案法では抑制できていることが分かる。1回目の移動では制御効果が徐々に劣化しているが、これは移動開始点がマップ更新の基準点であり移動距離が長くなるにつれて十分な精度の更新が行えなくなることが原因であると考えられる。しかし、1回目の移動と比較して、2回目の移動中における制御効果がより高くなっており、マップ信頼度を用いることによってマップの精度が高まっていることが分かる。2回目と4回目の移動中の制御効果にあまり変化はないが、4回目の移動終了後の方が高速に収束していることから、マップ更新が良好に行われていることが分かる。

4.2 中央の点で停止 次に、 $A \rightarrow B \rightarrow A \rightarrow C \rightarrow A$ の経路（移動経路2）で移動した場合のシミュレーション結果を図9に示す。3回目移動中（20～21.5秒）に、点Bを超えた後から制御効果が大きく劣化する点が特徴である。図10に3回目移動時の推定誤差を示す。比較のために、図8の1回目移動時における推定誤差を示している。これら2つのデータは点Bから点Cにおけるマップが更新されておらず、更新の基準点が点Aにおいて収束したフィルタであるという点が共通している。図10から、移動経路2の推定誤差は点Bを0.04m程度超えてから大きく劣化し、移動経路1

における1回目移動時の推定誤差とほぼ同程度になっている。これは、移動経路2では2回目移動までに点Aから点Bまでのマップは更新されているが点Bから点Cの更新は行われていないことと、点Aをマップ更新の基準点とする更新では点Bから点Cの更新が適切に行えないことが原因であると考えられる。

マップ更新基準点の違いによる制御効果の違いを確認するために、移動経路3： $A \rightarrow B \rightarrow C$ に沿う移動シミュレーションを行う。このシミュレーションでは、点Bから点Cへの移動を行っている時に、更新基準点が点Bであるという点が移動経路1の1回目移動時および移動経路2の3回目移動時と異なっており、更新基準点の違いによる制御効果の違いが分かる。シミュレーション結果を図11に示す。ただし移動を2度しか行わないことから、シミュレーション時間を20秒とした。図11から、2回目移動時（点Bから点Cへの移動時）に制御効果がそれほど劣化していないことが分かる。結果から、マップ情報が無い状態であって

Fig. 7 Stop points in experimental field

Fig. 8 Control effect by DAA or Filter-Map

Fig. 9 Control effect moving along $A \rightarrow B \rightarrow A \rightarrow C \rightarrow A$

Fig. 10 1st move of $A \rightarrow C \rightarrow A \rightarrow C \rightarrow A$ and 3rd move of $A \rightarrow B \rightarrow A \rightarrow C \rightarrow A$

も、マップ更新基準点が適切であれば、移動経路1の1回目移動時および移動経路2の3回目移動時ほど制御効果が劣化することはないものと考えられる。

このことを説明するために点Bから点Cまで移動する際の更新イメージを図12と図13に示す。図12

Fig. 11 Control effect moving along $A \rightarrow B \rightarrow C$

Fig. 12 Map update for $A \rightarrow B \rightarrow A \rightarrow C \rightarrow A$ when the position of the evaluating point is in between point B and point C

Fig. 13 Map update for $A \rightarrow B \rightarrow C$ when the position of the evaluating point is in between point B and point C

は移動経路2の3回目移動時に相当し、図13は移動経路3の2回目移動時に相当する。どちらの移動についても点Aから点Bまでは更新されており、点Bから点Cまでは更新されていない点が共通している。しかし移動経路2では点Bから点Cまでの更新に点Aにおいて十分収束したフィルタを用いているのに対し、移動経路3については点Bから点Cの更新に点Bにおいて十分収束したフィルタを用いている。移動経路

Fig. 14 Map update using C_B, D_B, K_B

Fig. 15 Update using C_A, D_A, K_A and update using C_B, D_B, K_B

Fig. 16 Update using C_A, D_A, K_A and update using C_B, D_B, K_B from 20 seconds to 21.5 seconds

3の方がより近い更新基準点（適切な更新基準点）であるので、移動中に制御効果が大きく劣化しないものと考えられる。

そこで図14に示すように、移動経路2において点Bを超えてからは更新基準点を点Bに切り換えた場合のシミュレーションを行う。シミュレーション結果を図15に示す。図15から3回目移動時には更新基準点を点Bに切り換えた場合に、より高い制御効果が得られることが分かる。違いを詳細に見るために図16に、3回目移動時の制御効果を示す。図16から、更新基準点を点Bに切り換えた場合には点Bを超えてからも制御効果が劣化することなく制御を行えていることが分かる。この結果は前述の更新イメージでの説明と一致することから、マップ更新の基準点を評価点の移動中に適切に設定することによって、移動中の制御効果の劣化抑制を行えると考えられる。今後、マップ情報とマップ信頼度を適切に利用することでより効果の高いシステムを検討する必要がある。

5. 結 言

本論文では、能動的音響制御において評価点が移動する場合の制御効果の劣化抑制について検討を行った。著者らが提案しているフィルタマップによる制御において、マップ信頼度を用いたマップの更新方法を新たに提案した。提案法の有効性を0.4m×0.4mの制御領域内における3種類の移動パターンによるシミュレーションによって検討し、以下の結論を得た。

1. 2点間を往復するシミュレーションにおいて、フィルタマップを提案法によって更新することで、直接法および幾何学的調整法よりも高い制御効果を得ることができた。さらに移動終了後の制御効果の回復も非常に高速であることを確認した。
2. 2点間の midpoint で一度停止する移動パターンによるシミュレーションでは、マップ更新を行っていない領域（マップ情報のない領域）へ移動した場合に、制御効果が劣化することを示した。
3. 2の問題に対し検討を行い、移動に伴ってマップの更新基準点を切り換えることで制御効果の劣化を抑制できることを確認し、適切な更新基準点の選択が必要であることを明らかにした。

本手法を用いたフィルタマップによる制御の実装・実験時には以下に示すような問題が想定される。

1. フィルタ係数をマップに保存していることから、大量のメモリが必要になる。
2. マップ更新に用いる幾何学的調整法およびマップ利用に用いる線形補間によって演算量が増大する

ため、高性能な処理系が必要になる。

3. オフィスルーム等の実環境における実験では、音源からの直接音だけでなく壁や床などからの反射音が存在するため、反射音を考慮していない幾何学的調整法によるマップ更新では制御効果が劣化する可能性がある。

今後は、これらの問題の解決を目標として実験を実施することで、本提案手法を実用的な制御手法へと改良する予定である。

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) Iida, H., Nakazawa, M. and Koike, S., "Active Noise Control of a Moving Evaluation Point in One Dimensional Acoustic Field(3rd Report, Proposal of Time-delay Separation Method in the Secondary Path Identification)", *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers. C*, Vol. 72, No. 714, pp. 402-408, 2006
- (4) Okuyama, T., Matsuhisa, H., Utsuno, H. and Park, J., "Active Noise Control for a Moving Evaluation Point Using Transfer Function Interpolation", *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers. C*, Vol. 71, No. 710, pp. 2904-2911, 2005
- (5) 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
- (6) 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