周波数領域適応アルゴリズムを用いた衝撃音の能動制御

○学 嘉村 俊一(九大院), 正 雉本 信哉(九大院)

正 木庭 洋介(九大院), 正 松田 浩一(九大院)

Active Control against Impact Noise using Frequency Domain Adaptive Algorithm

Syunichi KAMURA, Shinya KIJIMOTO, Yosuke KOBAYASHI, Koichi MATSUDA

Kyushu Univ. Dept. of Mechanical Engineering
744, Motoooka, Nishi-ku, Fukuoka, 819-0395 Japan

There are many noise sources around us. Floor impact noise such as the sound of footsteps and falling object becomes a problem in an apartment house. Floor impact noise has a peak at the low-frequency range and passive noise control for floor impact noise is difficult to control. Therefore, the purpose in this paper is control the impact noise with active noise control. Since the impact noise comes separately, active noise control with LMS algorithm based on the steepest descent method is difficult to the extent of slow convergence characteristics. In this paper, the effectiveness of active noise control using frequency domain adaptive algorithm that has fast convergence characteristics is confirmed through simulations and experiments.

Key Words : Noise Control, Adaptive Control, Digital Control, Frequency domain adaptive algorithm, Direct adaptive algorithm

1. 緒 言

現在, 私たちの生活空間の周りには多くの騒音が発生している. その中でも, 集合住宅において問題となる騒音として足音や物の落下による音に代表されるような床衝撃音が挙げられる. 床衝撃音は主に低い周波数にピークを持ち, 受動的に対策することは難しい. 従って本研究ではこのような衝撃音を制御対象とし, 能動音響制御を用いて抑制することを目的とする. 能動音響制御とは騒音に対し逆位相, 同振幅の制御音を干渉させることで騒音を打ち消す技術である. 衝撃音は単発的に発生する騒音であるため, 従来のような勾配法に基づくLMSアルゴリズムを用いた手法では収束速度が遅く, 十分に制御できないという問題がある. 本論文では高速に収束することが分かっている周波数領域適応アルゴリズム(FDAアルゴリズム)⁽¹⁾を収束性能の改善を目的として改良を加えたものを用い, 制御効果を制御シミュレーションおよび制御実験で確認する.

2. 能動音響制御

能動音響制御のアルゴリズムとして, 先に述べたFDAアルゴリズムを用いる. 本論文では直接法⁽²⁾にFDAアルゴリズムを適用した直接法FDAアルゴリズムを用いて制御効果を確認する. 直接法FDAアルゴリズムのブロック線図を図1に示す. 騒音源から誤差マイクまでの音響特性(一次経路特性)を W , 騒音源から参照マイクまでの音響特性を W_{ref} , 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 G とおく, また図中の信号について小文字は離散時間領域の量を, 大文字は周波数領域の量を, 上付きの $\hat{\cdot}$ は推定値を表している. FDAアルゴリズムは離散時間領域と周波数領域に分けられ, 離散時間領域ではディジタルフィルタの畳み込みの処理や周波数領域での計算のためのデータの保存を行っており, 周波数領域ではH1推定による制御経路の伝達特性の推定や周波数領域における畳み込み計算を行っている. 以下に更新式を示す.

Fig.1 Block diagram of direct adaptive algorithm FDA

$$\mathbf{U}(\omega) = \mathbf{K}(\omega)\mathbf{R}(\omega) \quad (1)$$

$$\hat{D}(\omega) = D(\omega)R(\omega) \quad (2)$$

$$\hat{\mathbf{Y}}_1(\omega) = \mathbf{K}(\omega)\mathbf{S}(\omega) \quad (3)$$

$$\hat{D}_i(\omega) = \hat{Y}_i(\omega) - E(\omega) = K(\omega)S(\omega) - E(\omega) \quad (4)$$

$$\hat{Y}_1(\omega) = E(\omega) - \hat{D}_1(\omega) = E(\omega) - D(\omega)R(\omega) \quad (5)$$

$$\hat{\mathbf{C}}_m(\omega) = \frac{U(\omega) \cdot \hat{\mathbf{D}}_1(\omega)}{U(\omega) \cdot U(\omega)} \quad (6)$$

$$\hat{D}_m(\omega) = \frac{R(\omega)^* \hat{D}_2(\omega)}{R(\omega)^* R(\omega)} \quad (7)$$

$$\hat{K}_m(\omega) = \frac{S(\omega) \cdot \hat{Y}_i(\omega)}{S(\omega) \cdot S(\omega)} \quad (8)$$

$R(\omega)$, $S(\omega)$, $E(\omega)$ はそれぞれ参照信号ベクトル $\mathbf{r}_k$, 制御信号ベクトル $\mathbf{s}_k$, 誤差信号ベクトル $\mathbf{e}_k$ に対して F F T を行い周波数領域へ変換したベクトルである. $\mathbf{K}(\omega)$, $\mathbf{D}(\omega)$ は周波数領域での伝達特性である.

この直接法FDAアルゴリズムは以前に本研究室で提案された直接法FDAアルゴリズム⁽³⁾に比べ、FFT回数を削減しているのでフーリエ変換の際の誤差が小さくなり収束性能が向上するものと考えられる。

また、FDA アルゴリズムは H 1 推定により求めた伝達関数の推定値を逆フーリエ変換により離散時間領域の値に変換する際に平均化処理を行う。平均化処理の方法として本研究室で提案された忘却係数を用いた指数平均による方法⁽³⁾を必要最低限の処理で行えるように改良を加えている。フィルタ更新 1 回目は計算された伝達特性の推定値を平均化せずに用い、2 回目以降は以下の式を用いて平均化を行う。

$$\overline{C}_{i_m}(\omega) = (1 - \lambda) \overline{C}_{(i-1)_m}(\omega) + \lambda \hat{C}_{i_m}(\omega) \quad (9)$$

式 (9) において λ は忘却係数, 上付きの $\bar{}$ は平均値を表す.

また、直接法FDAアルゴリズムを用いて制御を行うときに3つのフィルタ C 、 D 、 K を同時に更新開始していくと、制御不能になる。この問題はフィルタ更新初回でフィルタ K の計算が行われていないためにフィルタ C の推定計算に必要な信号が取得できないことが原因である。この問題を解決するために衝撃音のみを検出し1回の衝撃音につき1回のフィルタ更新を行う処理を導入し、1回目の更新ではフィルタ D のみを更新するとともにフィルタ C に初期値を与える。このとき、与える初期値は制御に影響が出ない程度の値を試行錯誤的に決定する。そして2回目の更新でフィルタ K の更新を開始し、3回目の衝撃音を検出されるまでに2回目の衝撃音のデータとフィルタ K を用いてフィルタ C の更新を行う。

なお、これ以降断りがない限り本論文で提案する直接法FDAアルゴリズムを提案法、以前に本研究室で提案された直接法FDAアルゴリズム⁽³⁾を従来法と記述する。

3. 制御シミュレーション

本章では制御対象音を衝撃音として、実際の音場を想定した制御シミュレーションを行う。第3・1節では衝撃音を発生させる装置について、第3・2節では制御シミュレーションで想定する音場について説明する。第3・3節で提案法と従来法、直接法LMSアルゴリズムの3つのアルゴリズムでの制御効果を比較する。

3・1 実験装置

衝撃音を再現するため、実際に木板を硬質ゴム製のボールで叩くことにより衝撃音を発生させる実験装置を用いる。ボールが木板に直接衝突すると高周波音も発生するのでボールと木板が衝突する場所にはウレタンシートを張り付けている。この実験装置の外観は図2、図3の通りである。

3・2 解析音場

この制御シミュレーションで想定する音場を図4に示す。衝撃音のサンプリングには加速度センサを用い、制御音源には低周波音の出力に適したサブウーファーを使用した。制御器にはDSP (Digital Signal Processor, DSP) を用いることを想定する。また、衝撃音は低周波数領域に偏っていることが考えられるので制御シミュレーションでの制御信号の計算には加速度センサと誤差マイクで取得した信号にカットオフ400Hzのローパスフィルタを通し使用する。

3・3 制御効果の比較

シミュレーション条件を表1に示す。本論文では衝撃音の発生回数を10回とし、提案法と従来法において参照信号と所望信号のコヒーレンスが悪い周波数では計算された伝達関数を0にする処理を行っている。コヒーレンスが悪い周波数では加速度センサで検出する加振点の振動と誤差マイクで検出する信号に関連性がないと考えられるので、制御精度を上げるためにこの処理によってコヒーレンスが悪い周波数での制御信号の出力を制限す

Fig. 2 Appearance of the experimental device

Fig. 3 Appearance of the experimental device

る．ここでは 30Hz～150Hz の周波数帯域は計算された伝達関数をそのまま用い、それ以外の周波数では伝達関数を 0 にする処理を行っている．このように、必要な周波数帯域のみの情報を利用して制御できる点は F D A アルゴリズムの特徴の一つである

単発騒音暴露レベルによる制御効果を図 5 に示す．横軸は衝撃音回数、縦軸は制御中の信号の単発騒音暴露レベルと制御前の信号の単発騒音暴露レベルの差である．この差が大きいほど制御効果が良好であるといえる．さらに、周波数特性において衝撃音 3 回目での制御前の信号と制御中の信号を比較したものを図 6 に示す．

図 5 より、直接法 LMS は 8 回目の衝撃音、従来法は 9 回目の衝撃音で 4dB 程度の制御効果で安定している．それに対し、提案法は 3 回目の衝撃音で 6dB 程度の制御効果で安定していることが分かる．さらに図 6 より、衝撃音 3 回目では、制御対象周波数帯域とする衝撃音のピークのうち直接法 LMS は 55Hz～85Hz のみで制御効果を得て、従来法は全く制御効果が得られていない．それに対して、提案法は衝撃音の主なピークである 60Hz～100Hz で平均して 20dB 程度の制御効果を得ている．

この結果より、制御シミュレーションにおいて提案法は直接法 LMS や従来法に比べ、衝撃音 2 回目での初期悪化はあるものの収束性と収束性能の両方で衝撃音に対して有効であることが確認できた．

Fig. 4 Acoustic field for simulation

Table 1 Simulation condition

Algorithm	Proposed	Conventional	DAA LMS
Sampling Frequency [Hz]	1000	1000	1000
Filter Length of Acoustic Property	400	400	400
Adaptive Filter Length	200	200	256
FFT interval	256	256	-
Forgetting Factor λ_C	0.01	0.1	-
Forgetting Factor λ_D	0.01	0.1	-
Forgetting Factor λ_K	0.01	0.1	-
Step Size Parameter μ_C	-	-	0.01
Step Size Parameter μ_D	-	-	0.01
Step Size Parameter μ_K	-	-	0.01
Initial Value of Filter $C \delta$	0.6	1	0.5

初期悪化について

提案法において図5より衝撃音2回目が増音していることがわかる。これは直接法における3つのフィルタ C , D , K を衝撃音1回目ではフィルタ D のみを更新し、フィルタ C に初期値を与える。このとき、

$$C_1 = [\delta, 0, \dots, 0]^T \quad (10)$$

となる。ただし $\delta > 0$ であり、表1における Initial Value of Filter C の値は δ である。その後、衝撃音2回目でフィルタ K の更新を始め、衝撃音3回目までにフィルタ C の更新を行い、衝撃音3回目で制御が可能な状態にしておく。従って、衝撃音2回目の制御信号の計算には式(10)で表されるフィルタで計算が行われるため、制御できずに増音してしまう。 δ の値による制御効果の違いを図7に示す。図7より δ の値を大きく増音するようになり、値を小さくすると増音することはなくなるが制御効果がほとんど得られなくなってしまう。従って、初期値の値を変更するだけでは初期悪化は防ぐことができないことがわかる。これにより、初期悪化の問題を解決するには衝撃音2回目までにフィルタ C の更新を始めなければならないが、第2章で述べた問題に加え、フィルタ D , K を同時に更新しようとするフィルタ D の推定の精度が低下するという問題があることから初期悪化を抑えることは難しいと考える。

4. 制御実験

本章では、第3章で行った制御シミュレーションでの有効性を確認するため、衝撃音を対象とした制御実験を行う。制御シミュレーションで示すことができた提案法による制御効果を直接法LMSによる制御効果と比較することで確認する。本章では第4・1節で実験での機器配置について、第4・2節で制御実験による提案法と直接法LMSの制御効果の比較を行う。

Fig. 5 Control effect in simulated result

Fig. 6 Frequency property in simulated result of 3rd impact noise

Fig. 7 Comparison of control effect by difference of delta

4・1 機器配置

制御実験における機器配置図を図8に示す。制御シミュレーションと同様に衝撃音のサンプリングには加速度センサを用い、制御音源には低周波音の出力に適したサブウーファーを使用した。制御器にはDSPを用い、制御対象となる衝撃音は第3章3・1節で説明した実験装置を用いる。各信号はカットオフ400Hzのローパスフィルタを通し使用する。

4・2 制御効果の比較

実験条件を表2に示す。制御実験においても制御シミュレーションと同様に衝撃音発生回数を10回とし、30Hz～150Hzまでは伝達関数の計算を行って、それ以外の周波数では伝達関数を0にする処理を行う。

単発騒音暴露レベルによる制御効果を図9に示す。制御効果の算出方法は制御シミュレーションと同様である。さらに、衝撃音3回目における制御前の信号と制御中の信号の周波数特性を図10に示す。

Fig. 8 Acoustic field for experiment

Table 2 Experimental condition

Algorithm	Proposed	DAA LMS
Sampling Frequency [Hz]	1000	1000
Adaptive Filter Length	200	256
FFT interval	256	-
Forgetting Factor λ_C	0.01	-
Forgetting Factor λ_D	0.01	-
Forgetting Factor λ_K	0.01	-
Step Size Parameter μ_C	-	0.01
Step Size Parameter μ_D	-	0.01
Step Size Parameter μ_K	-	0.01
Initial Value of Filter $C \delta$	0.7	1

Fig. 9 Control effect in experimental result

Fig. 10 Frequency property in experimental result of 3rd impact noise

図9より、衝撃音10回目において提案法と直接法LMSによる制御効果がほぼ同等になっている。直接法LMSは衝撃音の回数を重ねるにつれて徐々に制御効果を良くしているのに対して、提案法は衝撃音3回目において6dB程度の制御効果を得て、そのまま衝撃音10回目まで制御効果を維持していることがわかる。図10より制御対象周波数帯域を衝撃音の主なピークである60Hz～100Hzとして考えると、直接法LMSは55Hz～90Hzにおいて平均で10dB程度の制御効果であるが、提案法は60Hz～100Hzにおいて平均で20dB程度の制御効果を得ており、衝撃音3回目で既に衝撃音の主なピークを抑制できているといえる。

これらの結果より、制御実験においても制御シミュレーションと同じ傾向を示し、提案法の有効性を示すことができた。

5. 結 言

本論文では、以前に本研究室で提案された直接法FDA（従来法）に改良を加えた提案法を制御シミュレーションでは従来法と直接法LMSと比べることにより、制御実験では直接法LMSと比べることで衝撃音の制御に対して有効であるかどうかを検証した。明らかになったことを以下に示す。

- (1) 制御シミュレーションおよび制御実験において、直接法LMSや従来法より提案法のほうが早い段階で衝撃音を制御できることを確認した。
- (2) 直接法LMSでは衝撃音の主なピークである60Hz～100Hzの周波数帯域のうち狭い周波数帯域しか制御できていないが、提案法では60Hz～100Hzの周波数帯域を制御可能であることを確認した。
- (3) 以上の結果より、本論文で行ったフーリエ変換の際の誤差を軽減するためのFFT回数を削減する改良が制御シミュレーションおよび制御実験により妥当であることを確認した。

一方で、制御シミュレーションおよび制御実験の両方で50Hz以下の周波数帯域に存在するピーク、60Hz付近のピークが制御できていないことが確認できた。今後は、これらの問題の解決法を検討するとともに、生活空間への適用を考えて騒音源もしくは制御対象が移動する場合の制御シミュレーションや制御実験を行う必要がある。また、本論文では騒音源から評価点まで3mの距離での制御について制御効果を確認したが、居住空間に適用できるように騒音源から評価点までの距離を縮めた場合での制御効果についても確認を行う必要がある。

文 献

- (1) 雫本信哉, 下嶋浩, “能動的音響制御のための周波数領域適応アルゴリズム”, 日本機械学会論文集C編, Vol. 61, No. 589(1995), pp. 3581-3586.
- (2) 河野敏和, 太田悠介, 佐野昭, “2次経路の間接同定を必要としない能動騒音制御アルゴリズム”, 電子情報通信学会論文誌A, Vol. J86-A, No. 1(2003), pp. 9-18.
- (3) 古賀慎二, 雫本信哉, 松田浩一, “評価点の移動に追従する能動音響制御”, 日本機械学会九州学生会第41回卒業研究発表講演会論文集, No. 108-2(2010), pp. 277-278