논 문
58-11-35

자동 2차경로 추정기법을 이용한 안정한 능동소음제어

Stable Active Noise Control Using Auto-Secondary Path Estimation Techniques

남 현 도† · 서 성 대*
(Hyun Do Nam · Sung-Dae Seo)

Abstract - The adaptive IIR filters for active noise control systems are more effective when acoustic feedback exists, but the adaptive IIR filters could be unstable when the filter algorithm is not yet converged.
In this paper, auto-secondary path estimation techniques and a stabilizing process for adaptive Multi-Channel Recursive LMS (MCRLMS) filters are developed to improve the stability of multi-channel active noise control systems. Experiments using a TMS320VC33 digital signal processor in a three dimensional enclosure have performed to show the effectiveness of the proposed algorithm.

Key Words : Active noise control, auto-secondary path estimation, Multi-channel stabilized IIR filter, IIR LMS

1. 서 론

능동소음제어는 음의 간섭현상을 이용하여 소음과 180° 위상차이가 나고 크기가 같은 2차 음원을 발생시켜서 원하는 위치의 소음을 감쇄하는 방법으로 전향제어 기법과 궤환제어기법 등이 있으며, 적응필터 알고리즘으로는 LMS 알고리즘이 많이 사용되고 있다[1].

LMS 알고리즘은 구조가 단순하고 계산량이 적은 장점이 있지만, 광대역 소음원에 적용 할 경우 수렴 성능이 좋지 않은 단점이 있으며, 2차 경로의 추정이 정확하지 않는 경우에는 안정성이 떨어지게 된다. 제어기 성능에 중대한 영향을 주는 2차 경로의 전달 함수를 알아내는 방법으로 오프라인 추정방법이 많이 사용되고 있는데, 추정시간을 충분히 확보할 수 있으므로 추정의 정확도를 높일 수 있는 장점이 있으나, 제어 중에 2차 경로의 특성이 변하는 경우에는 전체 시스템이 불안정해질 수 있다. 반면 3차원 공간에서 2차 경로 실시간 추정 기법을 사용하면 계산량이 방대해져 실시간 구현이 어렵다[1].

본 논문에서는 추정하는 동안 지속적으로 누적오차를 관측하여 최적 수렴 특성과 안정도가 보장되는 추정계수 최적치를 자동 설정되게 하는 자동 오프라인 추정기법을 제안하였으며, 시스템의 작동 초기에 IIR 필터의 극점을 원점방향으로 끌어당겨 안정도를 개선하는 안정도가 강화된 MCRLMS 알고리즘을 사용하였다. 제안된 능동소음제어 시스템을 3차원 폐공간에 광대역 소음이 존재하는 경우에 적용하여 실험을 수행한 결과 우수한 특성을 얻었다.

† 교신저자, 시니어회원 : 단국대학교 공과대학 전자전기공학부 교수
E-mail : hdnam@dankook.ac.kr
* 정 회 원 : 단국대학교 대학원 전기공학과
접수일자 : 2009년 8월 18일
최종완료 : 2009년 9월 24일

2. 안정한 IIR LMS 알고리즘

다중채널 RLMS 알고리즘의 블록선도는 그림 1과 같다[2]. 여기서 J는 기준입력신호, K는 제어음원, M은 오차센서의 수이고, P(z)은 주경로 전달함수 행렬로 J×M, S(z)은 2차경로 전달함수 행렬로 K×M 요소를 갖는다.

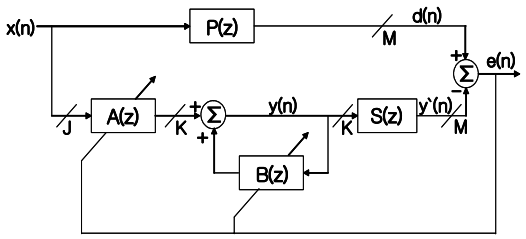


그림 1 다중채널 순환 LMS 알고리즘의 블록선도
Fig. 1 Block diagram of MCRLMS algorithms

다중채널 RLMS 알고리즘은 다음과 같이 표현된다[3].

$$A_{kj}(n+1) = A_{kj}(n) + \mu_a \sum_{m=1}^{M} X'_{jkm}(n) e_m(n) \quad (1)$$

$$B_{ki}(n+1) = B_{ki}(n) + \mu_b \sum_{m=1}^{M} Y'_{ikm}(n) e_m(n) \quad (2)$$

궤환제어 전달함수 행렬 $\mathbb{F}(z)$을 다음식과 같이 정의한다.

$$\mathbb{F}(z) = \begin{bmatrix} f_{11}(z) & f_{12}(z) & \cdots & f_{1K}(z) \\ \vdots & \cdots & \cdots & \vdots \\ f_{K1}(z) & \cdots & \cdots & f_{KK}(z) \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$f_{kk}(z)=1+rb_{kk,1}(n)z^{-1}+\cdots+r^{I}b_{kk,I}(n)z^{-I},\ 0\le r\le 1 \quad (4)$$

능동소음제어 초기에 오차가 커서 극점이 크게 변동되기 때문에 r을 0에 가까운 값으로 정해 원점방향으로 당겨주며 정상상태에는 r를 1로 하여 원래의 극점값을 가진다[3,4]. 즉,

$$r(n+1)=\lambda r(n)+(1-\lambda),\ r(0)=0,\ 0\le\lambda\le 1 \quad (5)$$

식 (5)와 같이 r을 가변시켜 가면서 순환 LMS 알고리즘의 안정도를 강화할 수 있다.

3. 2차 경로 전달함수 추정기법

3.1 오프라인 추정 기법

Filtered-x LMS 알고리즘에서는 2차 경로전달함수의 추정이 잘못되면 알고리즘이 발산할 수 있어, 2차 경로전달함수가 시불변이거나 알 수 없을 때는 오프라인 모델링을 행한다.

3차원 공간에서 2차 경로를 실시간 추정하는 적응 능동소음제어 기법을 적용하려면 계산량이 방대해져서 실시간 구현이 어렵고 2차 경로의 전달함수를 순 지연시간으로만 간주하면 제어계가 불안전해 지는 문제점이 있었다[5]. 따라서 2차 경로의 전달함수를 오프라인으로 추정하는 오프라인 추정기법들이 사용되었다[5].

오프라인 추정에 사용되는 신호는 이상적으로 모든 주파수 영역을 균등하게 갖고 있는 백색잡음을 이용한다. 그림 2는 오프라인 추정기법의 블록선도이다.

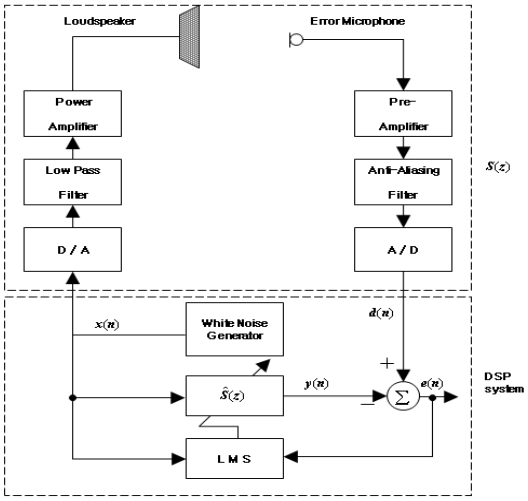


그림 2 오프라인 추정기법의 블록선도

Fig. 2 Block diagram of the off-line modeling

3.2 자동 2차 경로 추정 기법

본 논문에서는 1차원 음향 공간인 덕트와 3차원 음향 공간에서 같이 사용이 가능한 자동 2차 경로 추정 기법을 제안하였다. 제안된 알고리즘은 2차 경로의 추정오차가 일정한 값을 벗어나게 되면 초기화하여 새로 추정하여 알고리즘이 발산되는 것을 예방하였다.

1. 제어 대상 신호 $x(n)$을 발생시킨다.
2. 오차 센서로부터 목표신호 $d(n)$을 얻는다.
3. 다음과 같은 적응 알고리즘에 적용한다.
   ⓐ 출력을 계산한다.

$$y(n)=\sum_{l=0}^{L-1}\hat{s}_l(n)x(n-l) \quad (6)$$

   ⓑ 오차를 계산한다.

$$\boldsymbol{e(n)=d(n)-y(n)} \quad (7)$$

   ⓒ $e(n)$의 평균 값이 e_{ref}(오차 기준값)보다 작으면 추정을 중단한다. 이 때가 자동설정 상태이다. 여기서 e_{ref}의 결정은 반복 실험에서 얻은 좋은 특성을 보이는 실험치를 이용한다.
   ⓓ 적응필터 알고리즘을 이용하여 계수를 갱신한다.

$$\hat{\boldsymbol{s}}_l(\boldsymbol{n}+1)=\hat{\boldsymbol{s}}_l(\boldsymbol{n})+\boldsymbol{\mu x(n-l)e(n)},\ \boldsymbol{l}=0,1,\cdots,\boldsymbol{L}-1 \quad (8)$$

   ⓔ 적응 필터 $\hat{\boldsymbol{S}}(\boldsymbol{z})$가 최적해에 수렴할 때까지 위의 과정을 반복한다.
   ⓕ 반복추정 횟수가 미리 설정된 최대추정 횟수보다 크면 추정을 중단하여 시스템의 발산을 방지한다. 이때 최대추정 횟수는 실험에서 얻어진 시스템이 발산하지 않는 최대추정 횟수이다.

그림 2와 같이 시스템을 구성하고 기준입력 $x(n)$을 백색잡음 대신 제어할 해당 소음 신호를 사용했다. 백색잡음을 사용하는 것이 추정결과는 우수하였으나, 추정시간이 느리다는 문제가 있었다. 일반적으로 백색잡음의 경우보다 소음신호를 사용하는 것이 추정시간을 단축할 수 있었으며, 결과는 백색잡음을 이용한 경우와 유사한 성능을 보였다.

알고리즘의 구성은 추정 목표인 누적 오차 값이 일정 값이 되도록 추정된 전달함수 $\hat{\boldsymbol{S}}(\boldsymbol{z})$의 계수 벡터의 계수들을 조금씩 증가시켜 오차 값이 목적치에 도달하면 추정을 중단하고 ANC 시스템을 가동 시켜 소음제어를 진행한다. 이때 오차 값이 원하는 값에 도달하지 않으면 설정한 최대 추정시간을 기준으로 추정을 중단한다. 왜냐하면 무리하게 더 진행하면 계수벡터 값이 지나치게 커져서 시스템이 발산하게 된다. 목표 오차 값과 최대 추정시간 두 요소가 능동소음 제어시스템의 성능을 결정하는데 중요하게 작용한다.

또한 추정된 전달함수 $\hat{\boldsymbol{S}}(\boldsymbol{z})$ 값은 능동소음제어 시스템이 좋은 성능일 때 입력의 조건에 관계없이 일정 값이 된다는 것을 관측할 수 있었다. 즉 협대역, 광대역 소음 등 입력 소음의 파워에 관계없이 일정 값이 된다는 것을 확인 할 수 있었다. 2차경로 전달함수가 시변인 경우를 대비하여 주기적으로 오프라인 추정을 하도록 구성하였다[4].

4. 3차원 폐공간에서의 소음제어 실험

실험은 그림 3과 같이 1 x 2 x 4 시스템에 적용하여 성능을 평가하였다. 4개의 오차 센서 (마이크로폰)의 위치는 인체의 귀의 위치에 해당하는 높이인 1.6m 로 설치하였다.

제어용 스피커 및 마이크로폰의 위치는 그림 4의 폐공간 평면도와 같이 배치하였다. 시스템의 구성은 그림 3과 같이 3차원 폐공간 외부에 DSP 보드를 중심으로 프리앰프, 로우

패스필터, 파워앰프 등을 내장한 하드웨어 시스템이 연결 되어있으며, 소음원은 광대역 소음을 사용하였다.

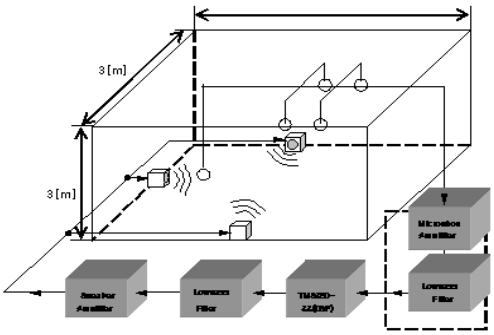


그림 3 능동소음제어 시스템의 전체 구성도
Fig. 3 Schematic diagram of the ANC system

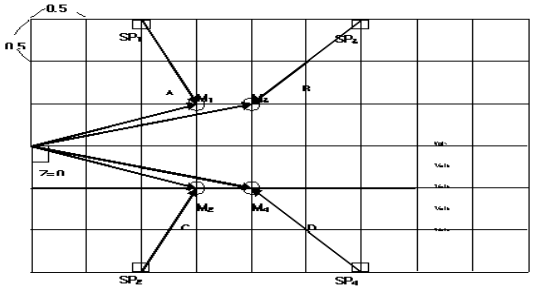
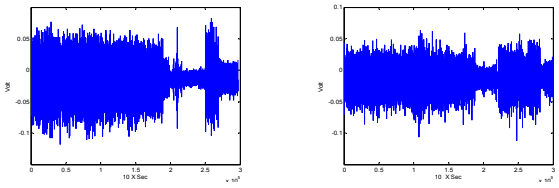


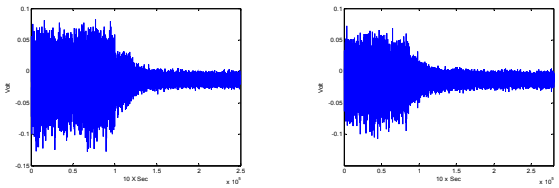
그림 4 실험용 폐공간 평면도
Fig. 4 A plane figure of an experimental enclosure

그림 5는 MCFX(Multi-Channel Filtered-X)LMS 알고리즘 적용 시, 광대역 소음원을 사용하고 필터차수 116, 수렴계수 0.00002 일 때 기존의 오프라인 추정법을 이용한 결과이며, 그림 6은 같은 조건으로 자동 2차경로 추정법을 이용한 결과이다. 그림의 세로축은 소음신호의 크기를 가로축은 시간을 나타낸다.



(a) Mic. #1 (b) Mic. #2

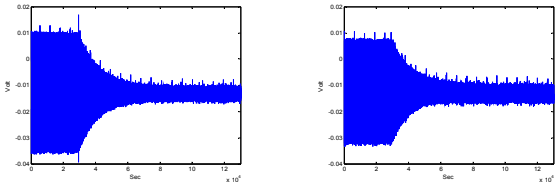
그림 5 MCFXLMS (Conventional 오프라인 추정)
Fig. 5 MCFXLMS (Conventional off-line estimation)



(a) Mic. #1 (b) Mic. #2

그림 6 MCFXLMS (자동 2차경로 추정)
Fig. 6 MCFXLMS (Auto Secondary path estimation)

그림 7은 안정한 IIR LMS 알고리즘을 적용하여 필터차수 24, 수렴계수 0.00002 일 때 자동 오프라인 추정법을 이용한 결과이다. 안정한 IIR LMS 알고리즘이 MCFXLMS 알고리즘보다 훨씬 작은 차수에서도(안정한 IIR LMS 알고리즘은 24, MCFXLMS 알고리즘은 116) 안정된 수렴특성을 보였다.



(a) Mic. #1 (b) Mic. #2

그림 7 안정된 IIR LMS (자동 2차경로 추정)
Fig. 7 Stable IIR LMS (Auto Secondary path estimation)

5. 결 론

본 논문에서는 3차원 폐공간에서의 능동소음제어를 위해 안정된 IIR LMS 알고리즘을 유도하였고, 기존의 오프라인 2차경로 추정 알고리즘을 개선한 자동 2차경로 추정 기법을 제안하였다.

능동 소음제어 실험을 위한 실험용 폐공간을 제작하였고, 마이크로폰, 증폭기, 필터 등 신호처리장비와 DSP 프로세서를 장착한 제어 보드와 멀티채널용 A/D, D/A 보드 등을 제작하여 능동소음제어 장치를 구현하였다.

제안된 알고리즘이 기존의 오프라인 추정기법을 사용한 능동소음 제어시스템보다 안정한 성능을 보이는 것을 실험용 폐공간에서 실험을 통하여 확인 할 수 있었다.

감사의 글

이 연구는 2008 학년도 단국대학교 대학연구비의 지원으로 연구되었음

참 고 문 헌

[1] S.M. Kuo. and D. Morgan, Active Noise Control System, John Wiley and Sons. Inc., New York, 1996.

[2] S. M. Kuo, H. T. Wu, F. K. Chen and M. R. Gunnala, “Saturation effects in active noise control systems,” IEEE Trans. on Circuits and Systems , Vol. 51, pp. 1163-1171, 2004.

[3] H.D, Nam and K.H. Baek, "Satbilized recursive LMS algorithms for active noise control," Internoise 2003, Jeju, pp.467-473, 2003.

[4] 서성대, “안정성이 강화된 적응필터를 이용한 능동소음제어,” 박사학위논문, 단국대학교, 2008.

[5] S.C. Douglas and T.H.Y. Meng, “Exact expectation analysis of the LMS adaptive filter without the independence assumption,” in Proc. ICASSP, Vol. IV, pp. 61-64, 1992.