

머리전달함수의 저차 모델링에 관한 연구

김동현^{*}, 김기만

한국해양대학교 전파공학과

A Study on Low-Order Modeling of HRTF

Dong-Hyun Kim, Ki-Man Kim

Dept. of Radio Sci. & Eng., Korea Maritime Univ.

E-mail : silhouet@chollian.net, kimkim@hanara.kmaritime.ac.kr

요 약

입체음향 시스템의 방향감 제어에서 필수적인 머리전달함수(Head-Related Transfer Function)는 일반적으로 FIR 또는 IIR 필터로 구현되며, IIR 필터의 경우 FIR 보다 비교적 저차 모델링이 가능한 장점을 갖는다. 본 논문에서는 Balanced Model Reduction(BMR) 방법을 이용하여 비교적 높은 차수를 가지는 FIR 형태의 HRTF 필터를 IIR 필터로 설계하고, 입체음향 시스템의 실시간 구현시 필수적인 계산의 효율을 높이는 방법을 제시한다. 또한 IIR 필터로 근사화된 HRTF 필터의 주파수 패턴을 분석하여, 음상정위에 큰 영향을 미치는 주파수 대역을 좀 더 나은 해상도를 갖도록 설계하여 저차 모델 설계시 발생하는 오차가 음상정위에 미치는 영향을 최소화 하였다.

I. 서 론

임의의 시간에 어떤 특정한 공간에서 발생한 음상을 다른 시, 공간에서 충실히 재현시키는 음상 제어 기술은 최근 멀티미디어, 가상 현실, 실감 통신 등 많은 분야에서 주목을 받고 있으며, 이를 시뮬레이션하기 위해서는 여러 가지 파라미터, 즉 공간전달함수, 머리전달함수(HRTF) 등이 필요하게 된다. 이중 HRTF는 자유공간에서 정위된 음원으로부터 사람의 귀로 전달되는 음향적 과정을 표현하며, 사람이 음원의 위치를 판단하는 중요한 정보를 포함하고 있다.

HRTF는 일반적으로 무향실의 임의의 어떤 위치에서 사람의 귀 또는 더미헤드에 설치된 마이크로의 임펄스 응답을 측정하여 얻을 수 있으며, 측정된 임펄스 응답을 필터의 계수로 직접 사용하여 FIR 형태의 HRTF 필터를 설계할 수 있다 [1].

그러나, 측정된 임펄스 응답은 시간영역에서 windowing하고, 최소위상변화를 갖도록 재구성해도 약 44.1kHz sampling rate에서 적어도 100~200개의 sample을 가지므로, 실시간 FIR 필터를 구현하기 위해서는 매우 많은 계산이 필요

하므로 HRTF 필터를 저차로 모델링하는 방법이 필요한데, 그 방법으로는 두 가지가 제시될 수 있다. 하나는 측정된 HRTF를 resampling하는 방법으로써, 만약 측정시 44.1kHz로 표본화된 HRTF를 그 절반으로 resampling한다면 22.1kHz의 sampling rate를 가질 것이고 샘플의 수는 50 ~ 100개로 줄어들 것이다. 하지만 이 방법을 사용하면 사용되는 음원 역시 22.1kHz의 표본화 주파수를 가져야 하므로, 현재 음의 녹음 추세로 볼 때 적당하지 않다. 제시될 수 있는 또 한가지 방법은 FIR 형태의 HRTF 필터를 IIR 형태로 변형하는 것이다. 일반적으로 FIR 필터를 IIR 필터로 모델링하는 방법에는 Prony 방법, Yule-Walker 방법 등이 있다[1].

본 논문에서는 이보다 좀 더 효율적 형태인 Balanced Model Reduction을 이용하여 비교적 높은 차수를 가지는 FIR 형태의 HRTF 필터를 IIR 형태로 설계하여 입체음향 시스템의 실시간 구현시 필수적인 계산의 효율을 높이는 방법을 제시하고, 기존의 설계 방법과의 비교를 통해 성능의 평가를 하고자 한다. 또한 IIR 필터로 근사화된 HRTF 필터의 주파수 패턴을 분석하여, 음상정위에 큰 영향을 미치는 주파수 대역을 좀 더 나은

해상도를 갖도록 설계하여 저차 모델 설계시 발생하는 오차가 음상정위에 미치는 영향을 최소화하였다.

II. BMR를 이용한 HRTF 필터 설계

일반적인 Balanced Model Reduction 방법은 FIR 필터와 IIR 필터 모두 적용이 가능하고, 그때의 결과는 모두 IIR 필터 형태가 되며, 다음과 같은 순서로 설계한다[2].

- 1) 전달함수를 state-space 형태로 변환한다.
- 2) controllability gramian과 observability gramian을 계산한다.
- 3) 시스템을 Balanced한 형태로 만들고 Hankel singular value를 계산한다.
- 5) Hankel singular value를 통해 시스템의 차수를 결정한다.
- 6) reduced order state-space 형태를 전달함수 형태로 변환한다.

그러나 여기서서는 BMR 방법의 계산을 좀더 간단히 하기 위해 FIR 필터에 적합한 BMR 방법의 특수한 형태를 사용한다[3].

먼저, N개의 계수값을 가지는 FIR 필터는 다음과 같은 전달 함수 형태로 나타낼 수 있다.

$$F(z) = c_0 + c_1 z^{-1} + \dots + c_n z^{-n} \quad (1)$$

$$= c_0 + F_1(z)$$

필터 F(z)를 state-space 형태로 변환하면 다음과 같다.

$$x(k+1) = Ax(k) + Bu(k) \quad (2)$$

$$y(k) = Cx(k) + Du(k) \quad (3)$$

여기서

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 1 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ & & & & \\ & & & & \\ 0 & 0 & \dots & 1 & 0 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$C = [C_1 \ C_2 \ C_3 \ \dots \ C_n], \quad D = C_0$$

이제 FIR 형태의 (A, B, C) 시스템에 대해서 다음과 같은 형태의 Hankel matrix를 구할 수 있다.

$$H = \begin{bmatrix} c_1 & c_2 & \dots & c_n \\ c_2 & c_3 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ c_n & 0 & \dots & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

(5)의 H matrix는 symmetric matrix이므로 다음과 같이 분해할 수 있다.

$$H = VAV^T \quad (6)$$

여기서

$$VV^T = I \quad \text{이다.}$$

n 차수 FIR 필터 (A, B, C)의 Hankel matrix가 (6)과 같이 분해된다면, k차수 reduced balanced 시스템은 다음과 같은 시스템으로 나타낼 수 있다.

$$(A_k, B_k, C_k) \quad (7)$$

여기서,

$$\begin{aligned} A_k &= V_k^T A V_k \\ B_k &= V_k^T B \\ C_k &= C V_k \end{aligned} \quad \text{이다.}$$

따라서, 앞서 필터 F(z)를 state-space 형태로 변환한 (4)식을 적용하면 다음과 같이 좀더 간단한 형태로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} A_k &= V(2:n, 1:k)^T A V(1:n-1, 1:k) \\ B_k &= V(1, 1:k)^T \\ C_k &= C V(1:n, 1:k) \end{aligned} \quad (8)$$

지금까지의 FIR 필터에 적합한 형태의 BMR 방법을 정리하면 다음과 같다.

- 1) Hankel matrix H를 만든다.
- 2) H matrix를 singular value decomposition 한다.
- 3) Hankel singular value를 나타내어 reduced order를 결정한다.
- 4) A_k, B_k, C_k matrix를 계산한다.
- 5) state-space로 표현된 시스템을 전달함수형태

로 변환한다.

III. 시뮬레이션 및 결과 고찰

대역별 해상도 다른 BMR HRTF 필터와의 성능 평가를 위해 일반적인 BMR로 설계된 HRTF 필터와 128 개의 tap수를 갖는 FIR 필터와 Prony method로 설계된 19/19 (pole /zero) tap IIR 필터, BMR로 설계된 19/19 tap IIR 필터를 비교하였다[4]. 여기서 사용된 HRTF는 채널당 128 sample 수를 갖는 MIT Media Lab.의 compact HRTF이다.

그림 1.은 128개의 tap수를 갖는 FIR 형태의 HRTF 필터 임펄스 응답이다. azimuth, elevation 모두 0°이므로 좌, 우는 모두 동일한 값을 가진다.

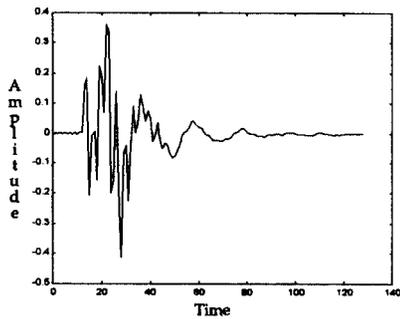


그림 1. 128tap FIR HRTF 필터의 임펄스 응답

그림 2.는 Prony method로 설계된 19/19 tap 을 가지는 HRTF 필터와 128 tap의 FIR HRTF 필터와의 시간 영역에서의 오차를 나타낸 것이다.

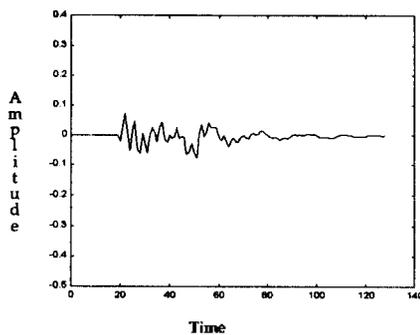


그림 2. 19/19 tap Prony method HRTF 필터 error plot (Time Domain)

그림 3.은 Prony method로 설계된 19/19 tap 을 가지는 HRTF 필터와 128 tap의 FIR HRTF 필터와의 주파수 영역에서의 오차를 나타낸 것이다.

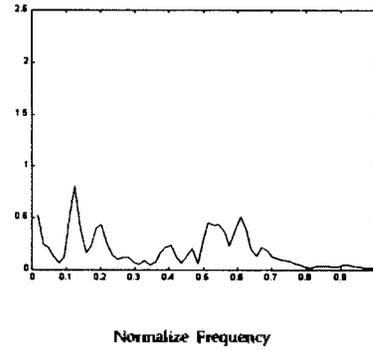


그림 3. 19/19 tap Prony method HRTF 필터 error plot (Frequency Domain)

그림 4.은 BMR로 설계된 19/19 tap을 가지는 HRTF 필터와 128 tap의 FIR HRTF 필터와의 시간 영역에서의 오차를 나타낸 것이다.

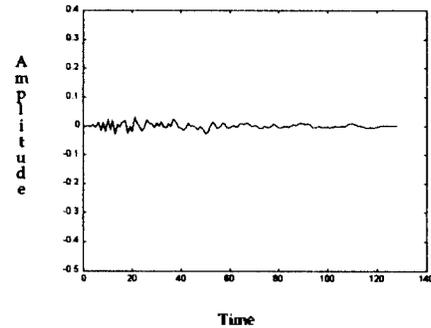


그림 4. 19/19 tap BMR HRTF 필터 error plot (Time Domain)

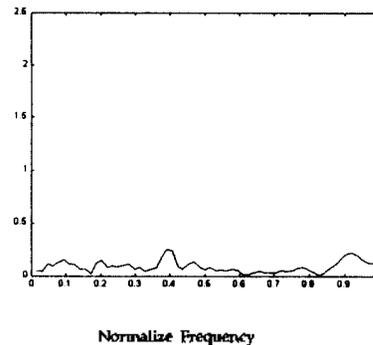


그림 5. 19/19 tap BMR HRTF 필터 error plot (Frequency Domain)

그림 5는 BMR로 설계된 19/19 tap을 가지는 HRTF 필터와 128 tap의 FIR HRTF 필터와의 주파수 영역에서의 오차를 나타낸 것이다.

위 결과에서 볼 수 있듯이 19/19 tap을 가지는 BMR 방법으로 설계된 HRTF 필터의 경우, Prony method로 설계된 경우보다 우수한 특성을 나타낸다.

또한 그림 6에서 볼 수 있듯이 BMR방법을 사용하여 매우 저차로 설계된 경우에 약 8kHz 이하의 주파수에서 오차로 인해 음상 정위가 불안정하였는데, 이러한 이 대역의 resolution을 향상 시킴으로써 좀 더 나은 필터의 결과를 얻을 수 있었다.

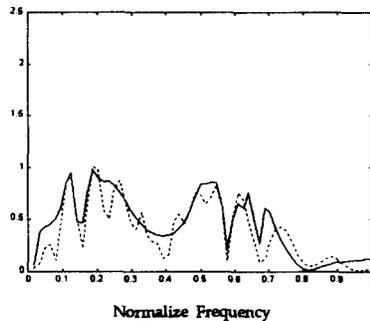


그림 6. 12/12 tap BMR(실선), 128 tap FIR (점선) 설계시 0도와 30도 사이의 오차 (Frequency Domain)

그림 7은 특정 주파수 대역의 resolution을 달리하여 BMR 방법으로 설계된 결과이다. 128tap을 가지는 FIR 필터와 거의 유사함을 볼 수 있다.

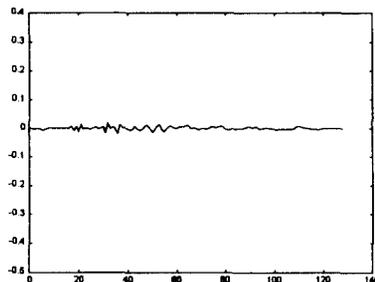


그림 7. 14/14(8kHz미만)tap, 14/14(8kHz이상)tap을 가지는 BMR 필터의 error plot (Time Domain)

IV. 결론

본 논문에서는 Balanced Model Reduction을 이용하여 비교적 높은 차수를 가지는 FIR형태의 HRTF 필터를 IIR 형태로 설계하였고, 기존의 설계 방법과 성능의 비교 평가를 수행하였다. 또한 IIR 필터로 근사화된 HRTF 필터의 주파수 패턴을 분석하여, 음상정위에 큰 영향을 미치는 주파수 대역을 좀 더 나은 해상도를 갖도록 설계하여 저차 모델 설계시 발생하는 오차가 음상정위에 미치는 영향을 최소화 하였다.

시뮬레이션 결과, 저차로 HRTF 필터를 설계하는 경우, 제안된 방법이 다른 필터 설계 방법보다 매우 우수한 특성을 보였다.

차후의 연구에서는 이를 DSP 프로세서로 구현하여 실시간 계산에 적합한 모델을 만들 예정이다.

참고문헌

- [1] J-M. Jot, V. Larcher, and O. Warusfel, "Digital signal processing issues in the context of binaural and transaural stereophony", in *Proc. 98th Audio Engineering Society Convention*, Paris, France, Feb. 25-28, 1995
- [2] H. Kimura and Y. Honoki, "Balanced approximation of digital FIR filter with linear phase characteristics", in *Proc. Int. Symp. Circuits Syst. (Kyoto, Japan)*, vol. 1, June 5-7, 1985, pp. 283-286.
- [3] Bartłomiej Beliczynski, "Approximation of FIR by IIR Digital Filter: An Algorithm Based on Balanced Model Reduction", *IEEE. Trans. Signal Processing*, vol. 40, no. 3, pp. 532-542, 1992.
- [4] T. P. Krauss, L. Shure, and J. N. Little, *Signal Processing Toolbox for Use with Matlab*, Mathworks, Feb. 1995.