

# 입체음향 구현을 위한 머리전달함수의 IIR필터 설계

## IIR Filter Design of HRTF for Implementation of 3D Sound

김판곤, 박장식\*, 김현태  
 동의대학교 멀티미디어공학과,  
 동의과학대학 영상정보과\*

Kim Pan-Gon, Park Jang-Sik\*, Kim Hyun-Tae  
 Dongeui Univ., Dongeui Institute of Tech.\*

### 요약

본 논문에서는 FIR 필터를 IIR 필터로 근사시키는 알고리즘을 제안한다. 제안하는 알고리즘은 균형화모델감소법의 개념을 바탕으로 한다. 더미 헤더의 머리전달함수를 32차 IIR 필터로 모델링한다. 근사화된 머리전달함수를 헤드폰을 통해 바이노럴 사운드로 재생하면 입체음향이 구현된다. 컴퓨터 시뮬레이션과 DSP 보드를 병행하여 실험하였다. 10명의 피실험자를 대상으로 한 실험을 통해 기존의 FIR 필터를 사용한 경우와 같이 IIR 필터로 구현한 근사화된 머리전달함수를 사용한 경우도 동일하게 인지된 것을 확인할 수 있었다.

### Abstract

In this paper, we propose an algorithm for the approximation of FIR filters by IIR filters. The algorithm is based on a concept of the balanced model reduction.

Head-related transfer functions(HRTFs) of dummy-head are approximated by 32-order IIR filters. The binaural sounds using the approximated HRTFs are reproduced by headphone, and serves as a cue of sound image localization. Experiment of sound image are carried out for 10 participants with computer simulation and DSP board respectively. The results of the experiments show that the localization using the approximated HRTFs by IIR filters is the same accuracy as the case of FIR filters that simulate the HRTFs.

## I. 서론

본 논문에서는 2 채널 입체음향 시스템을 효율적으로 구현하기 위하여 고차의 FIR 필터로 구현된 머리 전달함수를 낮은 차수의 IIR 필터로 변환하여 계산량을 줄이고자 한다. FIR 필터를 IIR 필터로 변환하는 방법으로는 Prony 방법[1,2]과 Yule-Walker 방법 [1,3]과 가중최소화 ARMA 모델[2], 대수오차 측정 ARMA 방법[4] 등이 있다. 본 논문에서는 고주파에서의 보다 나은 성능을 위하여 FIR 필터로 측정된 머

리전달함수를 IIR 필터로 변환하기 위하여 균형화모델 감소법(balanced model reduction)을 제안한다 [5]. 균형화 모델감소법의 기본적 원리는 상호 그라미안 행렬(cross-gramian matrix)의 가장 큰 고유값(eigenvalue)에 해당하는 고유공간(eigenspace)을 찾는 것이다[6]. 이때 상호 그라미안 행렬(cross-gramian matrix)은 대칭적이고 구성하기가 쉽다. 또 고유공간은 Schur form decomposition을 이용하여 계산한다[6]. 결국 제안하는 방법은 Hankel 고유값

을 구하여 큰 고유값에 해당하는 고유공간은 취하고 작은 고유값을 제거하여 차수가 낮은 IIR 필터를 구한다.

컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 주파수 영역에서 512차 FIR 필터로 측정된 머리전달함수와 균형화모델 감소법을 이용하여 32차 IIR 필터로 구현된 머리전달함수와의 차이가 거의 없음을 확인하고 32차 IIR 필터로 구현된 머리전달함수의 안정함을 증명한다. 그리고 균형화 모델 감소법을 이용하여 구현된 IIR 필터와 Prony 방법을 이용하여 구현된 IIR 필터를 주파수 영역에서 비교하여 제안하는 방법이 우수함을 보인다. 그리고 IIR 필터로 구현한 머리전달함수를 통과한 음성신호를 이용하여 청취 실험을 한 결과 FIR 필터와 유사한 정위감을 인지한다는 것을 확인한다. 32 비트 부동소수점 DSP인 TMS320C32를 이용한 하드웨어 실험을 통해 컴퓨터 시뮬레이션 결과와 유사함을 확인한다.

## II. 머리전달함수를 이용한 스테레오방식 입체음향

머리전달함수란 어떠한 특정 점에서의 음향 신호가 귀까지 도달하는 전달 경로의 특성을 말한다. 즉 사람이 음원의 위치를 파악하는 중요한 정보를 포함하는 임펄스 응답이다. 머리전달함수는 가상음향에서 빼놓을 수 없는 역할을 한다.

우선 헤드폰을 이용하여 가상음향을 재생하는 방법을 살펴보자. 사람이 음장에서의 음을 지각하는 요소가 고막으로 입사하는 음파에만 의존한다고 가정한다. 고막에서의 음을 직접 녹음하여 그 음압을 원 음장에서의 청취자 고막에 녹음된 음압의 진폭과 위상을 같게 재생시켜준다면 원음의 효과를 그대로 줄 것이다. 이것을 이용한 방법이 바이노럴(Binaural) 재생이라고 하는데 더미헤드 또는 실제 사람의 귀에서 녹음하고 헤드폰으로 재생하는 방법을 말한다. 주로

헤드폰이나 이어폰을 이용하여 재생을 하게 되는데 이를 위해서는 원하는 위치에 대한 귀의 응답, 또는 기준 지점에서부터 귀까지의 함수 즉 머리전달함수의 정보수집이 필수이다. 이를 취득하게 되면 어떠한 음원이라도 머리전달함수와 콘볼루션 연산을 통하여 청취자에게 가상음원의 효과를 줄 수 있다.

## III. 제안하는 머리전달 함수의 IIR 필터 구현

FIR 필터로 구현되어 있는 HRTF를 균형화모델감소법을 이용하여 IIR 필터로 구현한다. 먼저 전달함수를 상태공간형태로 변환시킨다. 표 1에 FIR 필터 구조의 전달함수를 상태공간 형태로 변환하는 과정을 나타내었다. 이렇게 구한 값을 기준으로 상호 그라미안 행렬을 구성한다. 이 때 상호 그라미안 행렬은 식 (1)과 같이 Hankel 행렬이 된다[6].

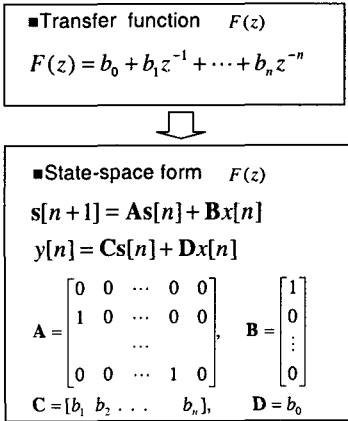
$$H = \begin{bmatrix} b_1 & b_2 & \cdots & b_n \\ b_2 & b_3 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ b_n & 0 & \cdots & 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

세 번째 단계는 유사변환(similarity transformation) 과정을 거치는 것이다. 이 과정에 관한 수식을 표 2에 나타내었다.

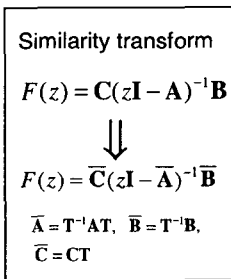
네 번째 단계는 Hankel 행렬을 분해한다. 여기서  $A$  은 대각 행렬이고  $I$ 는 단위행렬이다. 분해과정을 표 3에 나타내었다.

다섯 번째 단계는 Hankel 고유값을 전개해서 구현하고자 하는 필터 차수를 결정한다. 이때  $k$ 는 결정하고자 하는 필터의 차수를 나타낸다. 대각 행렬  $\Lambda_k$ 는 취하는 부분이고  $\Lambda_{n-k}$ 는 무시하는 부분이다.

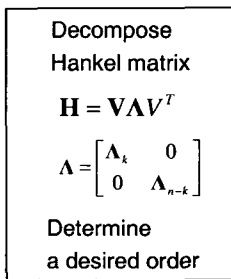
[표 1] FIR 필터 전달함수의 상태공간형태 변환



[표 2] 유사변환 과정



[표 3] Hankel matrix 분해



여섯 번째 단계는 필터 차수에 대응하는 A, B, C 행렬을 결정한다.

마지막으로 줄여진 차수에 해당하는 전달함수 상태 방정식으로 표현하면 식 (2)와 같다.

$$G_k = \mathbf{C}\mathbf{V}_k\mathbf{\Lambda}_k^{-1/2}(z\mathbf{I} - \mathbf{\Lambda}_k^{1/2}\mathbf{V}_k^T\mathbf{A}\mathbf{V}_k\mathbf{\Lambda}_k^{-1/2})^{-1}\mathbf{\Lambda}_k^{1/2}\mathbf{V}_k^T\mathbf{B} \quad (2)$$

## IV. 컴퓨터 시뮬레이션 및 DSP 보드 실험 결과

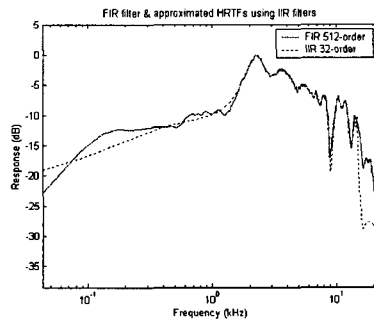
### 1. 컴퓨터 시뮬레이션 결과

임펄스 응답은 MIT의 Media lab에서 측정된 것으로 KEMAR 더미 헤드 마이크를 이용하여 측정된 것이다. 각각의 임펄스 응답은 512차의 길이를 가진다. 그림 1은 512차 FIR 필터 HRTF와 32차로 근사화한 IIR 필터의 주파수 특성을 비교한 것이다. 저주파 영역에서 다소 차이가 있지만 오차는 크지 않다.

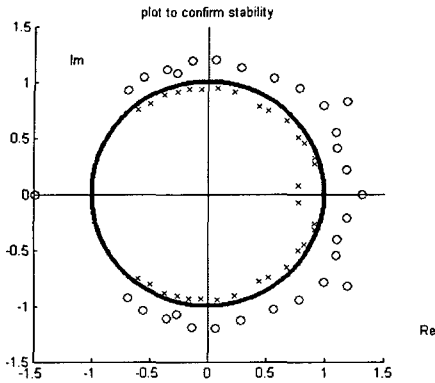
그림 2는 변환한 IIR 필터 계수의 안정성을 분석하기 위한 pole-zero 다이어그램이다. 극점이 모두 단위 원 안에 위치하는 것으로 보아 시스템이 안정한 것을 확인할 수 있다.

그림 3은 음상정위와 관련한 실험을 결과를 나타낸다. 512차 FIR 필터에 의한 결과에서 알 수 있듯이 사람들은 30도 방향을 정확하게 인지하지 못한다. 즉 30도에 가까운 오른쪽 방향임을 어렵듯이 인지할 수 있을 뿐이다. 왼쪽인지 오른쪽인지는 명확하게 인지하지만 정확한 각도는 정확하게 인지하지 못한다. 그것은 일반적으로 사람은 각도를 정확하게 인지하기 힘들기 때문이다.

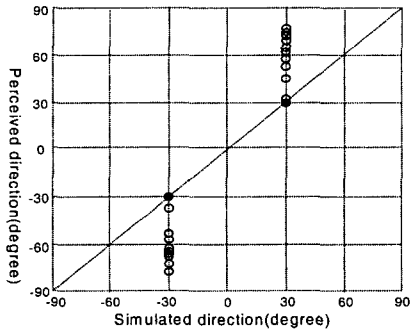
32차 IIR 필터의 경우도 512차 FIR 필터와 비슷한 결과가 나왔다. 하지만 그림을 자세히 살펴보면 조금 더 많은 사람들이 90도 부근에 몰려 있음을 확인할 수 있다. 32차 IIR 필터는 512차 FIR 필터보다는 각도를 인지하는 오차가 조금 더 크음을 알 수 있다.



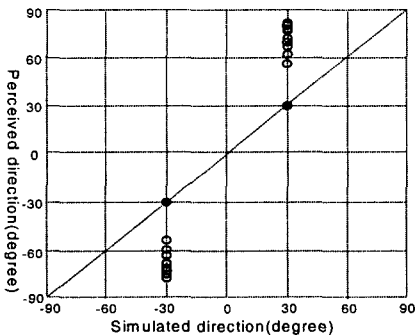
▶▶ 그림 1. 512차 FIR 필터와 32차 IIR 필터의 시뮬레이션 결과(30도 방위각의 머리전달함수)



▶▶ 그림 2. 안정성 검증을 위한 32차 IIR 필터의 시뮬레이션결과(30도 방향의 머리전달함수)



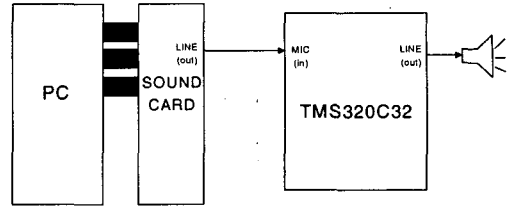
(a)



(b)

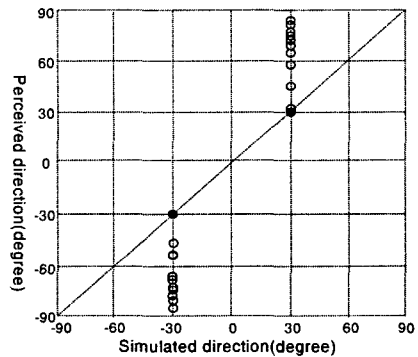
▶▶ 그림 3. 음상 정위에 대한 시뮬레이션 결과 (a) 512차 FIR 필터, (b) 32차 IIR 필터

## 2. DSP 보드를 이용한 하드웨어 실험 결과



▶▶ 그림 4. 하드웨어 구성도

하드웨어를 이용한 실시간 입체음향 구현을 위해 그림 14와 같이 구성하였다. 하드웨어는 텍사스 인스트루먼트사(Texas Instruments, TI)의 32비트 부동소숫점 방식의 DSP인 TMS320C32를 사용하였다. DSP보드에 IIR 필터로 구현된 머리전달함수를 실장하여 입체음향을 구현한다. 음성신호는 사운드 카드의 라인 출력을 통해서 DSP보드의 라인 입력되도록 한다. 그리고 라인 입력된 음성신호를 IIR 필터로 구현된 머리전달함수와 실시간으로 계산 처리하여 나오는 소리를 스피커로 출력한다. 음성신호는 16KHz로 샘플링한 여성의 음성을 사용했다.



▶▶ 그림 5. 음상 정위에 대한 실험 결과

그림 5는 TMS320C32를 이용하여 30방향과 330도 방향의 머리전달함수와 음성을 실시간 처리한 음성을 10사람에게 테스트한 결과이다. 가로축은 실험한 결과의 소리를 나타내고 세로축은 인지하는 방향을 나타내었다.

컴퓨터 시뮬레이션과 마찬가지로 사람들은 30도 방향과 330도 방향을 정확하게 인지하지 못한다. 컴퓨터 시뮬레이션에서의 음상 정위와 별 차이가 없음을 확인 할 수 있다.

## V. 결론

2 채널 방식 입체음향을 재생하기 위해서는 FIR 필터로 구성되는 머리전달함수를 통과하여야 한다. 그러나 FIR 필터인 머리전달함수는 차수가 많아 실시간 처리하는데 계산량이 많이 소요된다.

본 논문에서는 실시간 구현을 위하여 FIR 필터로 된 머리전달함수를 IIR로 구현하는 방법을 제안하고 32비트 부동소수점 DSP인 TMS320C32를 이용하여 입체음향을 구현한다. FIR 필터를 IIR 필터로 변환하기 위하여 균형화 모델 감소법(balanced model reduction)을 이용한다.

컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 512 차 FIR 필터를 IIR 필터로 변환하고 적절한 차수를 결정하였다. 시뮬레이션 결과 32 차 IIR 필터가 512 차의 머리전달함수와 유사한 성능을 보임을 확인하고 극점들이 단위원 근처에 위치하여 정밀도를 조정하는 경우 불안정해질 수도 있지만 안정함을 확인하였다. 그리고 TMS320C32를 이용하여 구현한 결과와 시뮬레이션 결과가 유사함을 알 수 있었다.

### ■ 참고 문헌 ■

- [1] J. Sandavvad and D. Hammershoi, "Binaural auralization comparison of FIR and IIR filter representation of HIR's," in Proc. 96th Audio Engineering Society Convention, Amsterdam, The Netherlands, Feb. 26-Mar. 1, 1994.
- [2] A. Kulkarni and H. S. Colburn, "Infinite-impulse-response filter models of the head-related transfer function" J. Acoust. Soc. Amer. Vol.97, No.5, pt. 2, p.3278
- [3] J.-M. Jot, V. Larcher, and O. Warusfel, "Digital processing issues in the context of binaural and transaural stereophony," in Proc. 98th Audio Engineering Society Convention, Paris, France, Feb. 25-28, 1995.
- [4] M. A. Blommer and G. h. Wakefield, "On the design of pole-zero approximations using a logarithmic error measure," IEEE Trans. Signal Processing, Vol.42, No.11, pp.3245-3248, 1994
- [5] B. Beliczynski, I. Kale, and G. D. Cain, "Approximation of FIR by IIR digital filters: An algorithm based on balanced model reduction, IEEE Trans. Signal Processing, Vol.40, No.3, pp.532-542(BMT방법)
- [6] Rabah W. Alhaheri and Nazeeh B. Al-Hussaini "Approximation of FIR by IIR Digital Filters Using Orthonormal Bases." ICICS'97 Singapore, 9-12 September 1997.
- [7] Hiroshi HASEGWA, Nonmember, Masso KASUGA, "Simply Realization of Sound Localization Using HRTF Approximated by IIR Filter" IEICE TRANS fundamentals, Vol. E83-A, No.6 June 2000.