

공간 재현을 위한 보정 IR 생성 및 실시간 컨볼루션 시스템

유태빈

동아방송예술대학교 음향제작학과

Generation of Corrective Impulse Responses and a Real-Time Convolution System

for Spatial Reproduction

Tae Bin Yoo

Dong-Ah Institute of Media and Arts

요약

공연 환경에서 목표 공간의 IR을 현재 공연장에 그대로 적용하면 현재 공간의 음향 특성이 중첩되어 의도한 공간감이 일관되게 재현되지 않을 수 있다. 본 연구는 현재 공연장 IR과 목표 공연장 IR을 비교하여 초기반사음 차이를 보정하는 Corrective Impulse Response를 생성하고, 이를 Max/MSP 기반 실시간 컨볼루션 시스템에 적용하는 방법을 제안한다.

제안 시스템은 정칙화된 역필터 기반의 보정 FIR을 생성하며, 시간 정렬, 게이팅, 대역 제한, 스무딩, 피크 제한 과정을 포함한다. 보정 FIR은 초기반사음 구간을 중심으로 동작하고, 목표 홀 IR의 약 200 ms 이후 리버브 테일은 별도의 컨볼루션 리버브로 보강하였다.

실험은 DIMA 지성관 콘서트홀을 현재 공간으로, University of York의 Sir Jack Lyons Concert Hall을 목표 공간으로 설정하여 진행하였다. 검증은 초기반사음 구간의 주파수 응답, 위상 응답, 상관계수 및 대역별 Coherence 분석을 수행하였다. 본 결과는 초기반사음 유사도 향상에 대한 1차 검증이며, 목표 홀의 완전 재현을 의미하지 않는다.

1. 서론

공연 음향에서 공간감은 청취 경험을 결정하는 중요한 요소이며, 잔향 시간, 반사 구조, 주파수 응답, 음압 분포에 따라 다르게 인지된다. 컨볼루션 리버브는 실제 공간에서

측정된 IR을 이용한다는 점에서 사실성이 높지만[1], 공연 환경에서는 현재 공연장의 음향 특성이 목표 IR과 중첩되기 때문에 의도한 공간감이 일관되게 재현되지 않을 수 있다[2][3][4]. 따라서 본 연구는 현재 공연장의 IR과 목표 공연장의 IR을 비교하여 초기반사음 중심의 보정 IR을 생성하고, 이를 Max/MSP 기반 실시간 컨볼루션 시스템에 적용하는 방법을 제안한다. 여기서 공간 재현은 목표 홀의 물리적 음장 복제가 아니라, 무대 리깅 AB 마이크와 서라운드 스피커 구조를 기준으로 목표 홀의 초기 응답과 잔향감을 보강하는 의미로 사용한다.

2. 제안 시스템

2.1 보정 IR의 기본 개념

본 연구에서 생성되는 보정 IR은 실제 구현상 FIR 필터로 사용되므로, 이하에서는 구현 관점에서 보정 FIR이라는 용어를 함께 사용한다. 제안 시스템의 목표는 다음과 같다.

$$\text{Current Hall IR} * \text{Corrective IR} \approx \text{Target Hall IR}$$

이를 주파수 영역에서 표현하면 다음과 같다.

$$B(\omega)F(\omega) \approx A(\omega)$$

여기서 $A(\omega)$ 는 목표 공간 IR의 주파수 응답, $B(\omega)$ 는 현재 공간 IR의 주파수 응답, $F(\omega)$ 는 생성하고자 하는 보정 필터이다. 이상적인 조건에서는 $F(\omega) = A(\omega) / B(\omega)$ 로 표현할 수 있으나,

실제 측정 IR에는 주파수 댐, 잡음, 측정 오차, 공간 모드 등이 포함된다. 따라서 본 연구에서는 특정 대역의 과도한 증폭이나 링잉을 줄이기 위해 다음과 같은 정칙화된 역필터 형태를 사용하였다[6][7].

$$F(\omega) \approx \frac{A(\omega)B^*(\omega)}{|B(\omega)|^2 + \lambda}$$

여기서 $B^*(\omega)$ 는 $B(\omega)$ 의 켈레복소수이며, λ 는 정칙화 항이다. 따라서 보정 FIR은 단순한 '목표 IR / 현재 IR'이 아니라, 제한된 정칙화 역필터에 가깝다.

2.2 초기반사음 중심 보정과 리버브 테일 처리

보정 FIR은 전체 잔향을 역보정하는 필터가 아니라, 초기반사음이 포함된 초기 응답 구간을 중심으로 설계한 필터이다. Python 스크립트에서는 목표 IR의 피크와 감쇠 레벨을 기준으로 게이트를 생성하고, 해당 구간에서 현재 IR과 목표 IR의 응답 차이를 정칙화 역필터 방식으로 보정한 뒤, 시간 영역 FIR 중 약 40 ms 구간을 초기 보정 성분으로 사용하였다.

실제 공연 시스템에서는 초기반사음 보정 FIR과 목표 홀 리버브 테일을 분리하여 운용하였다. Max/MSP의 multiconvolve~에서는 각 서라운드 스피커 채널별 보정 FIR을 실시간으로 컨볼루션하였고[9], 실제 공연 운용에서는 목표 홀 IR에서 약 200 ms 이후의 구간을 분리하여 Convolve XT를 통해 별도로 적용하였다. 40~200 ms 구간은 별도 역보정 대상이 아니라, 보정 FIR의 잔여 응답과 목표 홀 리버브 테일이 이어지는 전이 구간으로 처리된다. 즉, 본 시스템은 초기반사음 보정과 목표 홀 후기 잔향 보강이 결합된 하이브리드 구조이다.

2.3 Python 기반 보정 IR 생성

보정 FIR 생성을 위해 현재 공간 IR과 목표 공간 IR을 입력한다. 스크립트 구조에서는 목표 홀 IR을 hall, 현재 공연장 IR을 club으로 정의하였다. 두 IR의 샘플레이트가 다를 경우 목표 홀 IR을 현재 공연장 IR의 샘플레이트에 맞추어 리샘플링하여 사용하였다.

IR의 시간 정렬은 GCC-PHAT 기반의 delay estimation을 사용하였다[5]. 두 IR의 직도달음 위치가 어긋나면 시간 지연 차이가 위상 차이로 해석될 수 있으므로, 시간 정렬은 보정 필터 생성에서 중요한 과정이다. 시간 정렬 결과는 보정 FIR 생성 후, 현재 IR과 보정 FIR을 컨볼루션한 결과를 목표 IR과 다시 비교함으로써 확인하였다.

정칙화 항 λ 는 고정 상수가 아니라 현재 IR의 최대 크기와 reg_db 파라미터에 의해 다음과 같이 결정된다.

$$\lambda = \left(\max|B(\omega)| \cdot 10^{\frac{reg_{db}}{20}} \right)^2$$

기본 설정에서 reg_db는 -32 dB이며, 이는 현재 IR의 최대 크기를 기준으로 역필터의 과도한 증폭을 제한하기 위한 값이다. 보정 필터는 125 Hz~4 kHz 대역을 중심으로 설계하였고, 복소수 smoothing, gain clipping, passband masking, peak limiting을 적용하여 과보정, 링잉, 헤드룸 부족을 방지하였다. 최종 보정 FIR은 현재 공간 IR에 컨볼루션한 결과와 목표 IR 사이의 초기 구간 정렬을 다시 확인한 뒤 wav 파일로 출력하였다.

2.4 Max/MSP 기반 실시간 적용

생성된 보정 FIR은 Max/MSP 기반 실시간 컨볼루션 프로세서에 적용하였다. 실제 패치는 AB 스테레오 마이크 입력, 채널별 보정 FIR 컨볼루션, 목표 홀 리버브 테일 처리, 서라운드 출력 라우팅으로 구성된다.

무대 상부 AB 마이크 신호는 adc~ 1 2로 입력되어 6개의 서라운드 채널로 분배되며, 각 채널에는 SLF, SRF, SLC, SRC, SLB, SRB에 해당하는 보정 FIR이 로드된다. 이후 multiconvolve~와 Convolve XT VST를 통해 초기반사음 보정과 목표 홀 리버브 테일 처리를 수행하였다.

서라운드 스피커는 위치와 모델이 서로 다르므로, 각 채널별 IR을 따로 측정하고 목표 IR과 비교하여 개별 보정 FIR을 생성하였다. 실제 공연에서는 메인 PA가 직접음과 기본 밸런스를 담당하고, 서라운드 시스템이 목표 공간의 초기반사음과 잔향감을 보강하였다.

표 1. 시스템 처리 구조

처리 단계	내용
입력	무대 상부 AB 스테레오 마이크
보정 FIR 생성	두 공연장 IR을 비교하여 FIR 파일 생성
초기반사음 처리	보정 FIR 적용
후기 잔향 처리	리버브 테일을 Convology XT로 적용
출력	6채널 서라운드 스피커로 개별 라우팅

3. 실험 및 결과

3.1 실험 공간

본 연구의 실제 적용은 화요콘서트 2주차 공연에서 진행되었다. 현재 공간은 DIMA 지성관 콘서트홀이며, 라이브밴드 공연을 주 목적으로 하는 약 200석 규모의 공연장이다. 해당 공간의 500 Hz 대역 잔향시간은 직접 측정한 IR 기준 T30 0.39 s로, 비교적 짧은 잔향 특성을 가진다.

목표 공간은 University of York의 Sir Jack Lyons Concert Hall로 설정하였다[10]. 이 공간은 클래식 콘서트를 목적으로 하는 약 350석 규모의 공연장이며, OpenAIR 기준 500 Hz 대역 T30은 1.89 s이다. 본 연구는 짧은 잔향을 가진 라이브밴드 홀에서 긴 잔향을 가진 클래식 콘서트홀의 초기반사음 특성과 잔향감을 보강하는 것을 목표로 하였다.

3.2 시스템 적용

화요콘서트 2주차 시스템은 좌·우 후면에 총 6개의 서라운드 스피커를 배치하는 방식으로 설계되었다. 좌우 4개의 스피커는 d&b MAX, 후면 2개의 스피커는 Behringer B112를 사용하였고, 메인 스피커는 Turbosound IQ12와 IQ18을 사용하였다. 이후 4열 중앙 객석을 기준으로 설정하고, 각 서라운드 스피커의 레벨, 주파수 응답, 위상 응답을 얼라인먼트하였다. 생성된 보정 FIR은 피아노, 어쿠스틱 기타, 남녀 혼성 듀엣으로 구성된 어쿠스틱 음악 무대에 적용되었다.

IR 측정을 위해 무대 상부에 RØDE NT5 Matched Pair를 AB

방식으로 설치하였다. 각 서라운드 스피커에서 테스트 신호를 재생하고, AB 스테레오 마이크로 해당 스피커와 공간의 응답을 캡처하였다. 이는 서라운드 출력이 공간을 거쳐 무대 리깅 AB 마이크로 재유입되는 시스템 경로를 모델링하기 위한 측정이다. 측정된 IR은 Python 스크립트로 입력되어 목표 홀 IR과 비교되었고, 각 스피커 채널별 보정 FIR이 생성되었다.

3.3 검증 결과

보정 FIR 생성 후, 현재 시스템 경로 IR에 보정 FIR을 컨볼루션한 결과와 목표 공간 IR을 비교하였다. 주파수 응답 분석 결과, 보정 대역인 125 Hz–4 kHz 범위에서 목표 IR과 보정 결과 사이의 차이가 감소하는 경향을 보였다. 특히 500 Hz, 1 kHz, 2 kHz와 같이 공간감과 명료도 인지에 중요한 대역에서 보정 효과가 나타났다.

Python 스크립트는 초기 0–40 ms 구간의 상관계수와 125 Hz, 250 Hz, 500 Hz, 1 kHz, 2 kHz, 4 kHz 중심 대역의 Coherence를 산출한다. Coherence는 magnitude-squared coherence 방식으로 계산하였으며, nperseg = 4096, noverlap = 2048을 기본값으로 사용하였다. 단, 0–40 ms처럼 분석 구간이 짧은 경우 nperseg를 구간 길이에 맞추었고, 저역 값은 참고 지표로 해석하였다.

이 검증은 특정 측정 위치, 시간 구간, 주파수 대역에서 보정 결과와 목표 IR 사이의 수치적 유사도를 확인한 1차 검증이며, 실제 관객 위치의 최종 청취 응답을 직접 증명하는 것은 아니다. 실제 공연 적용 결과, 보정 FIR과 Convology XT를 결합한 서라운드 시스템은 기존 리버브 이펙터와 다른 방식의 공간 확장을 제공하였다.

4. 한계 및 개선 방향

4.1 보정 IR의 한계

본 연구에서 생성한 보정 FIR은 현재 공간의 모든 음향 특성을 목표 공간으로 완전히 변환하는 필터가 아니며, 보정

대상은 주로 초기반사음 구간에 한정된다. 또한 피드백, 레이턴시, 헤드룸, 스피커 출력 한계, 마이크와 스피커 간 음향 결합, 관객 입장에 따른 흡음 변화 등으로 인해 현장에서의 적용 정확도에는 한계가 있다. Python 스크립트는 후기 성분에 대한 ratio filter 생성 구조도 포함하지만, 실제 공연 운용에서는 목표 홀 IR의 200 ms 이후 리버브 테일을 Convology XT에서 별도로 적용했으므로, 공연 결과는 보정 FIR과 목표 홀 리버브 테일 컨볼루션이 결합된 결과로 해석해야 한다.

4.2 검증 방식 및 청감 평가의 한계

본 연구의 검증은 보정 FIR이 적용된 현재 시스템 경로 IR과 목표 공간 IR의 초기 응답 구간을 비교하는 1차 검증이다. 그러나 보정 FIR 생성에 사용한 데이터를 다시 비교한 것이므로 관객석 전체의 최종 청취 성능을 증명한다고 보기는 어렵다. 향후 연구에서는 보정 없음, 목표 IR 직접 컨볼루션, 제안 방식, 목표 홀 IR을 동일 조건에서 비교하고, RT, EDT, C80, D50, 에너지 감쇠 곡선 및 청취 평가를 통해 공간감, 명료도, 잔향감, 목표 공간 유사도를 정량적으로 평가할 필요가 있다[8].

5. 결론

본 연구는 현재 공간과 목표 공간의 IR을 비교하여 초기반사음 중심의 보정 FIR을 생성하고, 이를 Max/MSP 기반 실시간 컨볼루션 시스템에 적용하는 방법을 제안하였다. 알고리즘은 IR 입력, 샘플레이트 통일, GCC-PHAT 기반 시간 정렬, 게이팅, 정칙화 역필터 계산, 125 Hz-4 kHz 대역 제한, 스무딩, 피크 제한을 포함한다.

실제 적용은 DIMA 지성관 콘서트홀에서 진행되었으며, 목표 공간은 University of York의 Sir Jack Lyons Concert Hall로 설정하였다. 실험 결과, 보정 대역과 초기반사음 구간에서 목표 IR과 보정 결과 사이의 유사도가 향상되는 경향을 확인하였다. 본 연구는 목표 홀의 물리적 음장을 완

전히 재현한 결과라기보다, 초기 응답 보정과 목표 홀 리버브 테일을 결합하여 공연 환경에서 목표 공간의 음향적 인상을 보강한 실험적 접근으로 의의를 갖는다.

참고 문헌

- [1] A. Farina, "Simultaneous Measurement of Impulse Response and Distortion with a Swept-Sine Technique," Audio Engineering Society Convention 108, preprint 5093, Paris, France, 2000.
- [2] H. Kuttruff, Room Acoustics, 6th ed., CRC Press, 2016.
- [3] M. Barron, Auditorium Acoustics and Architectural Design, 2nd ed., Spon Press, 2010.
- [4] J. Blauert, Spatial Hearing: The Psychophysics of Human Sound Localization, MIT Press, 1997.
- [5] C. H. Knapp and G. C. Carter, "The Generalized Correlation Method for Estimation of Time Delay," IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing, vol. 24, no. 4, pp. 320-327, 1976.
- [6] O. Kirkeby and P. A. Nelson, "Digital Filter Design for Inversion Problems in Sound Reproduction," Journal of the Audio Engineering Society, vol. 47, no. 7/8, pp. 583-595, 1999.
- [7] J. N. Mourjopoulos, "Digital Equalization of Room Acoustics," Journal of the Audio Engineering Society, vol. 42, no. 11, pp. 884-900, 1994.
- [8] ISO 3382-1, Acoustics - Measurement of room acoustic parameters - Part 1: Performance spaces, International Organization for Standardization, 2009.
- [9] A. Harker and P. A. Tremblay, "The HISSTools Impulse Response Toolbox: Convolution for the Masses," Proceedings of the International Computer Music Conference, 2012.
- [10] University of York AudioLab, "Jack Lyons Concert Hall," OpenAIR: Open Acoustic Impulse Response Library, accessed September 2025.