

Sound Design

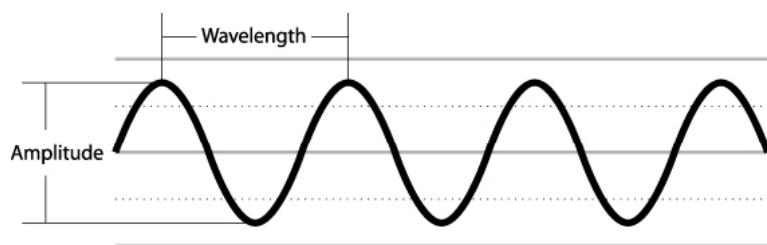
470420-1
Fall 2013
10/28/2013
Kyoung Shin Park
Multimedia Engineering
Dankook University

What Good is Sound?

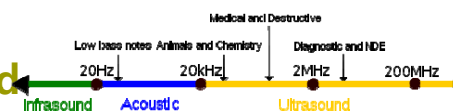
- 사운드는 영상적 (visual)인 부분을 더욱 향상시켜줌
- 사운드는 우리 주변에 항상 있는 것임 (surround)
- 사운드는 풍부한 정보를 제공하는 근원임
- 사운드는 음향심리학적 효과를 제공함

The Physics of Sound

- 소리 (Sound)는 음원에서 물체가 진동하여 공기라는 매체의 압력을 변화시킴으로써 생성되어 환경과 상호작용하는 파형 (waveform)의 형태로 우리의 귀에 전달됨
- 소리의 기본 요소
 - 주파수(frequency), 진폭(amplitude), 음색 (tone)



The Physics of Sound



- 주파수 (Frequency)
 - 초당 소리 파형의 반복 횟수 (the number of cycles that a vibration completes in one second)
 - 소리의 높낮이 (the height of a sound wave, i.e., amplitude)를 결정
 - 주파수가 크면 고음이고, 주파수가 작으면 저음이 됨
 - 주파수는 파장 (람다 lambda)와 역수 값의 관계
 - $f = v/\lambda$ (v 는 위상 속도, λ 는 파장)
 - 측정단위는 Hertz/Hz 또는 cps (cycles per second)
 - 초당 몇 번 진동하는지를 의미함
 - 일반적으로 사람이 낼 수 있는 주파수 대는 약 100Hz~6KHz
 - 사람의 가청 주파수대는 약 20Hz~20KHz 사이
 - 사람의 청각은 1KHz~6KHz에서 가장 민감함
 - 사람의 가청 주파수대를 오디오(Audio)라고 구분하여, 사운드를 처리하는 것이 오디오를 처리하는 것과 같다고 보는 생각도 있음

The Physics of Sound

□ 진폭 (Amplitude/Intensity)

- 음압 (The pressure of sound waves in the atmosphere)
- 파형의 기준선에서 최고점까지의 거리를 의미하며, 진폭은 사람에게 느껴지는 소리 세기와 바로 연관됨
- 소리의 세기는 음압 변화의 비율로 표현, 즉 Logarithmic scale 데시벨(dB) 값으로 측정됨 $N = 20 \log P_1/P_2$
 - P_1/P_2 : the two pressures to be compared
 - N: the number of decibel
- 기준 음압 (Common Reference Level): 0.0002 dyn/cm²
 - 평균 인간이 1000 Hz 톤으로 들을 수 있는데 필요한 최소 음압
- 다양한 소리들의 진폭 (in dB)
 - 앞이 바스락거리는 소리, 조용히 숨쉬는 소리 : 10 dB => reference level의 10 배
 - 1 미터 거리에서 일상적인 대화: 40-60 dB
 - 100 미터 거리에서 이륙시 제트엔진 소리: 110-140 dB => reference level의 수백만 배
 - 청취하기에 고통스러운 소리: 140dB

The Physics of Sound

□ 음의 높낮이 (Pitch)

- 심리적으로 느껴지는 음의 주파수 (The psychological perception of frequency)
- 심리적이고 감성적인 효과를 제공함
- 낮은 피치 (pitch) - 더 침울함

□ 음의 세기 (Loudness)

- 음의 진폭과 높낮이에 의해서 느껴짐 (Perceived from *both* amplitude *and* pitch)
- 낮은 피치 (pitch) 소리는 조용하게 들림

□ 음색 (Timbre)

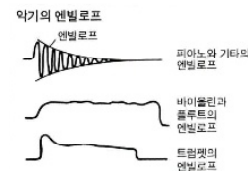
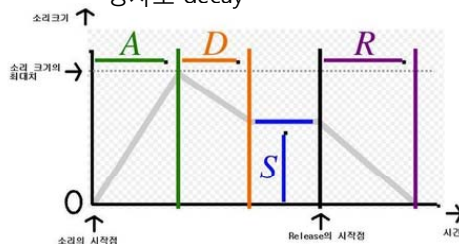
- 전체적인 소리의 색깔 (The tone quality or "color" of a sound)
- 같은 음의 높이(pitch)와 세기 (loudness)를 가진 두 개의 소리를 구분 짓게 함 (예: 같은 악장을 연주하는 바이올린과 플루트의 경우)

ADSR Envelope

□ 엔벨로프 (Envelope)

http://en.wikiaudio.org/ADSR_envelope

- ADSR (Attack, Decay, Sustain, Release) - 시간에 따른 음량의 변화
 - Attack - 소리가 시작된 후 최고 레벨까지 도달하는 데 걸리는 시간
 - Decay - 최고 레벨에서부터 감소하여 Sustain에 도달하는데 걸린 시간
 - Sustain - 소리의 크기가 감소된 상태로 지속하는 시간
 - Release - 소리의 잔향의 길이를 조절
- 타악기 vs 현악기
 - 타악기는 attack이 매우 짧으며, 반면 현악기는 attack이 길고 완만한 경사로 decay

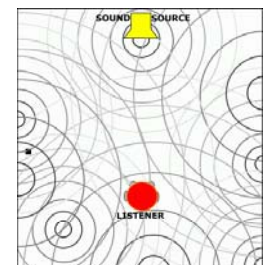
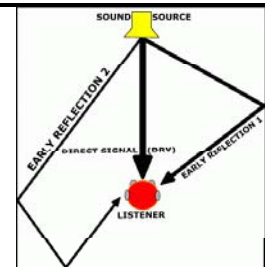


The Psychology of Sound (Psychoacoustics)

- Psychoacoustics은 소리의 인지와 사람이 주관적으로 느끼는 반응을 다룸
 - 환경과 우리의 경험을 전체적으로 연결해주는 것임

□ 실내음향

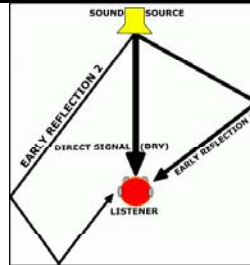
- 직접음(Direct sound): 청취자에게 가장 먼저 직접적으로 전달
- 초기음(Early sound): 초기 반사음
- 잔향 (Reverberant sound or "Reverb"): 음원의 공급이 끝난 후 시간이 경과함에 따라 소리의 크기가 서서히 줄어들면서 계속 남아서 들리는 현상



The Psychology of Sound (Psychoacoustics)

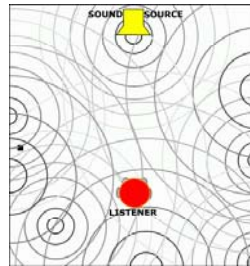
□ 잔향 (Reverb) vs. 울림 (Echo)

- **잔향효과 (Reverb)**는 여러 벽에 부딪치면서 청취자에게 소리의 느낌을 공간적으로 제공함 (random delay of sounds, at < 35ms)
- **잔상효과 (Echo)**는 소리의 반복적인 울림 (evenly delayed sounds, at > 35ms)



□ 소음 (Noise)

- 모든 유형의 원치 않는 소리
- 원래 나타내고자 했던 음의 주파수를 제외한 나머지 주파수의 모든 것
- 즐거운 소리는 일반적인 웨이브 패턴이 있고, 패턴은 반복됨. 그러나 소음은 불규칙 웨이브 패턴이 있음



Complex Sound & Fourier Analysis

□ 대부분의 실제 소리들은 복합음 (Complex Sound)

- 각기 다른 주파수를 가진 소리들로 구성
- 복합음의 구성
 - 기본음 (Fundamental sound): basic frequency
 - 배음 (Harmonics) : multiple of fundamental
 - 예 : 기본음 440 Hz -> 배음 880 Hz, 1320 Hz, 1760 Hz, etc
- 기본음과 배음의 상대적 강도는 음색을 결정
 - 예 : 바이올린의 C4와 피아노의 C4
 - 푸리에 분석을 통해 구성 주파수와 상대적 강도를 파악

□ 푸리에 분석 (Fourier Analysis)

- 복합음(복합패턴)을 수학적 절차에 의해 다수의 개별 정현파들로 분할 및 분석
- 인간의 귀/청각시스템도 마찬가지로 방식으로 분석함
- 인간의 귀/청각시스템에 대한 생리적 접근을 해야 하는 이유

Sound Design

□ Sound는 크게 음성(Voice/Speech), 음향효과 (Sound Effects), 음악 (Music)의 세 분야로 분류

- 음성(Voice/Speech) : 인간의 목에 있는 후두의 성대가 진동하면서 나오는 목소리
- 음향효과(Sound Effects) : 라디오나 TV, 영화, 연극 등에서 극적인 효과를 내기 위해 사용하는 자연적이거나 인공적인 소리의 연출 기법
- 음악(Music) : 소리를 소재로 하여 박자, 선율, 화성, 음색 등을 일정한 법칙과 형식으로 종합해서 사상과 감정을 나타내는 예술을 의미

□ 컴퓨터에서 처리하는 방법에 따라서, Sound는 디지털 오디오(Digital audio)와 미디(MIDI)로 분류

- Digital audio : 아날로그 형태의 사운드를 디지털화시킨 것
- MIDI : 전자악기와 다른 기계(컴퓨터)간에 정보를 주고 받기 위해 만든 통신 protocol

Speech

- 정보를 전달하는 주요한 수단 중 하나로, 음성을 사용하면 정보가 좀 더 손쉽고 빨리 전달할 수 있음
- 디지털화된(digitalized) 음성과 합성(synthesized)된 음성으로 나뉨
- **음성적 (Verbal)과 비음성적 (Nonverbal)**
 - Non-verbal의 예시 : 'The Sims'게임에서 웃음소리, 한숨 소리, 우는 소리, 등등
- **서술 (Narration)**
 - Text보다 정보를 빠르고 이해하기 쉽고, 설득력 있게 전달할 수 있음
- **대화 (Dialogue)**
 - 두 사람 간에 감정(예를 들어 화남, 긴장감, 친함 등)을 전달할 수 있는 대화 (non-verbal일지라도 가능함 - 예: Knights of the Old Republic)

Sound Effects

- 정보 전달 시, 강조하거나 보조하는데 사용함
- 영화나 TV에서, 대화나 음악 없이 배경효과로 사용되어 특정 장소나 상황을 좀더 현실감 있게 전달 (예: 문을 쿵 닫는 소리, 총쏘는 소리, 비 오는 상황, 공사 현장 등) 할 수 있음
- 사운드 이펙트는 자연적인(natural) 효과와 합성된(synthesized) 효과로 나뉨

Sound Effects

- Contextual sound/Narrative sound
 - 소리의 발생시 영상의 해석을 도와줌 (예: 비행기가 뜰 때, 비행할 때, 사고가 생겼을 때의 제트 엔진 소리)
- Focusing attention (sound spatialization을 통해)
- Defining space (열린 공간 vs. 닫힌 공간)
- Establishing a place (하늘 vs. 물 속인 경우)
- Creating environment (무드/분위기 생성 시)
- Emphasizing/Intensifying action (폭발음)
- Setting pace (자동차 엔진 소리)
- Symbolizing meaning (맞는 vs. 틀린 대답인 경우)
- Unifying transitions (다음으로 부드럽게 넘겨줌)
- 오디오 파일 - 사운드 콜라주의 순서는 이야기를 생성할 수 있음

Music

- 정보 전달 시, 주로 분위기를 조성하는 데 사용함
- 단독으로 사용 가능 함
- 멀티미디어 정보전달 시 부수적인 효과(분위기나 장면 전환, 감정의 고조) 생성함
- 적절하게 사용되어야 함

Music

- Establishing place (음악 스타일)
- Creating environment/atmosphere
- Emphasizing action (템포, dynamics)
- Intensifying action (리듬, dynamics)
- Depicting identity (캐릭터의 주제음악)
- Setting pace (템포, rhythm)
- Setting time (음악 스타일/period- e.g. classical)
- Unifying transitions (lead-ins, segues and overlaps)

Music

- 음악을 사용할 시 고려해야 할 점들:
 - **Spotting** : 비디오 게임에서 언제 어떤 음악 (music), 음향 효과 (sound effects), 배경음 (ambiance)을 선택할 지를 결정하는 과정
 - **Main titles** : 게임의 초기 분위기를 형성 (그러나, 실제 gameplay 와 일치하는지 조심하게 선택되어야 함)
 - **Music painting** : 배경 음악
 - **Leitmotifs** : 중심 사상(themes), 예: 특정 캐릭터를 위한 음악 테마
 - **Weighted music** : 영화에서 우리를 완전히 울게 만드는 음악
 - **Orchestration / instrumentation** : 한 편의 음악을 묘사하는 악기의 종류 (예: classical vs. techno).
 - 또한, 여러 개의 음악들이 연속적으로 통합되어야 함
 - **Cues** : 새로운 이벤트를 경고함, 예: 폭발에서 전투모드로 바뀔 때
 - **Unifying transitions** (lead-ins, segues between scenes)

Digital Audio

- 아날로그형태의 사운드를 디지털화시킨 것
- 원음에 충실하기 위해서는 많은 용량이 필요함
- 음악 CD수준의 3분 정도의 음악을 위해서 약 30 MB가 필요함
- **사용환경**
 - 사람의 목소리가 존재하는 경우
 - 연주하는 하드웨어를 완전히 제어할 수 없는 경우
 - 디지털화된 파일을 처리할 수 있는 컴퓨터 환경이 지원되는 경우 (메모리, 하드디스크, CPU power)

MIDI

- 전자악기와 다른 기계(컴퓨터)간에 정보를 주고 받기 위해 만든 통신 protocol
- 실제 소리는 갖지 않고 연주방법과 연주시기에 대한 정보를 가짐
- 3분 정도의 미디음악을 듣기 위해서 약 8KB가 필요함
- **사용환경**
 - 사람의 목소리가 필요 없는 경우
 - 메모리나 하드디스크의 용량이 부족한 경우나 CPU의 처리속도가 낮을 경우
 - 좋은 MIDI 사운드 음원(sound module)을 갖고있는 경우
 - 연주하는 하드웨어를 완전히 제어할 수 있는 경우

Sound Design

- Multimedia Production에서 Audio Media의 역할
 - **Sound parallels picture** : 오디오 요소가 영상적 요소와 결합하여 무드를 생성하고 그것 중 하나만을 사용할 때보다 더 정보를 전달을 효과적으로 함 (총소리, 대포소리, 고뇌에 찬 외침 등의 사운드가 전투신을 보완함. 전쟁의 잔인성과 파괴성이 두 개의 미디어를 통해 전달되면서 효과를 더욱 증대함.)
 - **Sound defines picture** : 사운드는 특이해서 정신적 이미지가 영상 보다 전에 생성됨 (폭포소리나 새소리)
 - **Picture defines sound** : 사운드는 그림의 글자대로 해석임 (비바람 치는 사나운 폭풍우는 crashing wave sound를 요구함)
 - **Sound counterpoints picture** : 관련 없는 정보를 가진 양쪽 미디어 요소가 합쳐져서 하나의 미디어 요소로는 전달할 수 없는 효과를 생성함 (music score during battle in Gladiator - 11:25)

Silence

- 정적 (Silence “is deafening”)
- 멀티미디어 재생에서 매 순간마다 사운드로 넘칠 필요는 없음
- 정적 (Silence)도 무드를 생성하는 데 사용할 수 있고 또한 반성을 위한 순간을 제공할 수 있음
- 영상이 지속적으로 병렬인 반면에 오디오 채널은 영상에서 감탄의 소리가 쓰이면 보다 효과적으로 주의를 끌 수 있음
- 인간의 두뇌는 변화(CHANGE)를 감지하는데 전문가임

Sound Production

- 음원 (Sound Sources)
 - Production libraries
 - Internet
 - Recording (Foley/collecting)
 - Sampling (copyright)
- 오디오 프로그래밍 APIs
 - DirectSound & DirectMusic : DirectX API에 하나
 - OpenAL : 멀티 플랫폼에서 사용가능
 - 라이선스가 필요한 3rd party audio-libraries
 - Miles Sound System (www.radgametools.com)
 - FMOD (www.fmod.org)
 - Saurora (for PC, Xbox, PS2, Nintendo, ...)

Sound Production

- 게임 오디오 프로그래밍을 위한 API:
 - Low-Level API
 - 2D 사운드에 대한 기본 동작 (play, pause, stop, pan, volume, ...)
 - 3D 사운드에 대한 기본 동작과 제어 (position, velocity, ...)
 - 2D 뮤직컬 세그먼트에 대한 기본 동작 (play, pause, stop, ...)
 - Hardware 기능 추상화
 - Mid-Level API
 - PCM wave 파일 로드 기능
 - 대용량 오디오 파일 스트리밍
 - Sequential music segments들을 큐잉(queueing)하는 기능
 - Sound Resource Management
 - Sound Load/Unload 내역 관리
 - One-function loading and playback on demand
 - Handle multiple compressed audio formats, (including Ogg Vorbis, MP3, WMA, ...)
 - 각종 음향 효과(예: environmental reverberation) 지원 함수들
 - High-Level API
 - Script parsing and loading sounds 기능
 - Creating a high-level soundscape system
 - Creating an advanced dynamic musical cueing and transition system based on the audio scripting system

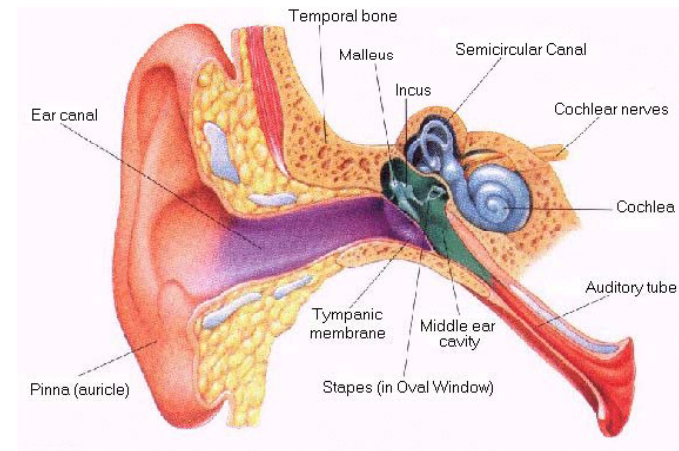
Sound Production

- 믹싱 (Mixing)
 - Goal format이 무엇일지 꼭 기억하자! (e.g. tape vs. cd vs. cheap speakers vs. surround sound)
 - Localize/spatialize (잔향)
 - Layer (여러 개의 사운드를 사용)
 - Levels (믹싱할 때 여러 개의 다른 “loudnesses” 를 시도해볼 것)
 - Audition
 - Audition with game – i.e., 게임에서 테스트 & 여러 개의 사운드와 함께 테스트해볼 것

In Your Game

- 본인이 개발하고자 하는 게임과 가장 비슷하면서도 세상에 잘 알려진 상용 게임을 찾아본다.
- 눈을 감는다.
- 다른 사람에게 그 게임을 실행시키고, 그냥 듣는다.
- 이제, 본인이 직접 그 게임을 실행해보면서 다음과 같은 질문에 답을 해본다:
 - 왜 이러한 음성, 음향효과, 음악이 있는지?
 - 이러한 사운드는 영상에게 무슨 영향을 주는 건지?
 - 이 사운드가 영상에는 어떻게 무슨 영향을 주는 건지?
 - 이 중에 좀 이상한 것이 있나?
 - 이러한 사운드를 생성하는데 어떠한 방법이 사용됐을 까?
- 게임 설계를 할 때, 위의 질문을 해 보면서 어떻게 사운드 디자인을 할 지를 고민할 것이며 문서화해 둘 것!
- 게임 데모 시, 게임 플레이를 하면서 먼저 영상을 보여주지 않은 상태로 사운드를 들어 볼 것!

Audition



http://www.infj.ulst.ac.uk/~pnic/HumanEar/Andy's%20Stuff/MScProject/workingcode_Local/EarChapter.html

Auditory System

- 귀
 - 외이 (Outer/External ear) : 소리의 수집과 증폭
 - 중이 (Middle ear) : 소리의 진동 정보를 활동 전위 (action potentials)로 전달
 - 내이 (Inner ear) : 뇌가 청각정보를 해석할 수 있도록 신경 전달
- 뇌와 청각각
 - 청각로 (Auditory pathway)
 - 청각피질 (Auditory cortex)

Auditory System

- 외이 (External ear)
 - 음파의 초기 처리의 기능을 수행함 : capturing, focusing, filtering
 - 귓바퀴 (Pinna)
 - 귓바퀴의 형태는 중이와 내이에 전달되는 소리들을 조절함
 - 위치와 방향에 대한 탐지 정보도 제공함
 - 외이도 (Outer ear canal)
 - 외이도는 고막과 연결되어 귀를 보호하고 일정한 온도를 유지
 - 고막 (Tympanic membrane or Eardrum)
 - 진동정보를 중이에 전달함

Auditory System

□ 중이 (Middle ear)

- 뼈 구조물(Ossicles)과 뼈를 감싸고 있는 근육조직으로 구성
- 소리에너지를 집중 및 증폭 기능을 수행함
- 소골 (Ossicles) : 추골 (Malleus), 침골 (Incus), 등골 (Stapes)
 - 고막 -> 추골 (hammer) -> 침골 (anvil) -> 등골 (stirrup) -> 내이의 달팽이관(Cochlea)의 난원창 (Oval window)으로 소리의 전달
 - 상호작용으로 난원창에 도달한 소리 (진동정보)는 고막에서 출발한 소리보다 20배 이상 증폭이 가능
 - 만약 소리가 너무 큰 경우 근육조직이 진동을 축소시키거나 약화시킴
- 소골을 관리하는 2개의 근육조직
 - 고막장근 (Tensor tympani) : 추골과 고막에 부착되어 있는 것으로 내이의 수용기 세포들을 치명적 크기의 소리로부터 보호함
 - 등골근 (Stapedius) : 등골근에 부착되어 있는 것으로 중이 내의 전반적인 소리를 감소시킴

Auditory System



□ 내이 (Inner ear)

- 소리를 신경신호로 변환함 (즉, 진동 정보의 활동 전위 전환)
- 와우각 (달팽이관; Cochlea)
 - 직경 4mm 펼쳤을 경우 길이 35~40 mm
 - 난원창 (oval window) : 와우액 (cochlear fluid)의 진동을 유발함
 - 와우액의 진동은 다시 기저막 (basilar membrane)의 진동을 유발하고 이 진동은 기저막 내에서 이동
 - 기저막의 진동은 융모 세포 (hair cells)의 구부러지고 펴지는 활동을 유발하여 활동전위가 일어남
 - 각기 다른 음고는 와우각의 각기 다른 위치에서 탐지됨
 - 고음고 (High pitches) : at the base of the cochlear (near the oval window)
 - 저음고 (Low pitches) : at the apex

Auditory System

□ 청각로 (Auditory pathway)

- 와우각은 청각의 본격적인 시작
 - 와우각은 청각신경 (청각로)과 연결
 - 궁극적으로 와우각(기저막)에서 분석된 정보가 뇌로 전달됨
- 청신경
 - 활동 전위 정보를 측두 피질 (temporal cortex)에 전달함
 - 각기 다른 종류의 소리는 피질의 각기 다른 부분으로 전달됨
 - 소리가 특별한 의미를 지닌 경우에는 측두 피질 이외의 부분도 활성화됨
- 하구 (Inferior colliculus)
 - Auditory reflex를 담당
- 청각장애 (Deafness)
 - Conduction deafness, sensorineal deafness, central deafness



3D Sound Localization

□ 음 위치화(spatialization)의 생리학

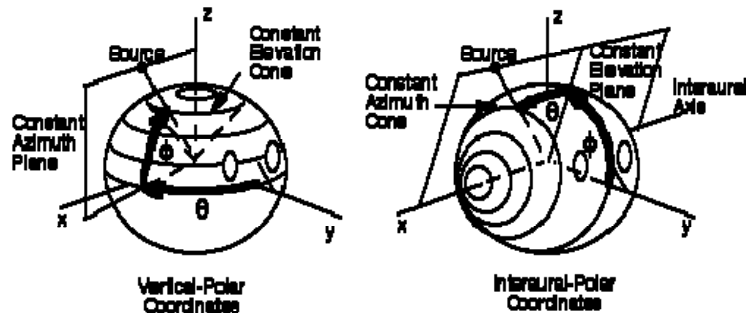
□ 양이 단서

- 양이간 시간차 (Interaural time differences: ITD)
 - 두 귀에 도달하는 소리의 시간 차이
- 양이간 강도차 (Interaural intensity differences : IID)
 - 머리로 인한 shadow
 - 저주파보다 고주파가 더 영향을 받음

□ 신경원

- 양이간 시간차에 반응하는 신경원
 - 피질에 양이간 시간차 탐지기 (interaural time difference detector) 존재 - 일반적으로 800 ms에 가장 민감함
- 공간상의 특정 위치에 반응하는 신경원

Vertical-Polar Coordinate System



- q: azimuth (angle between the nose and a plane containing the source and the vertical axis z)
- f: elevation (angle between the horizontal plane by a line passing through the source and the center of the head)
- r: range (distance to the source measured along this line)

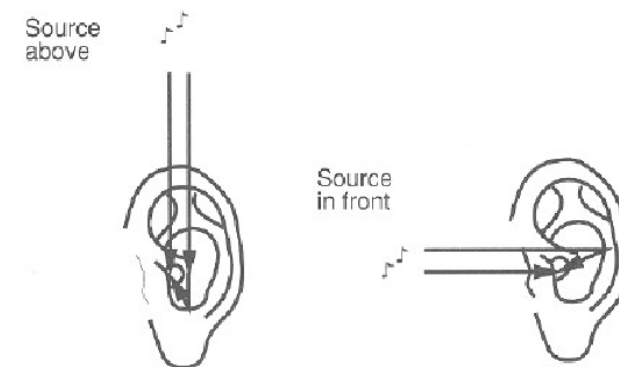
Azimuth Cues

- Interaural time difference (ITD)
 - 두 귀에 도달하는 소리의 시간 차이
 - Azimuth angle이 0일 때 ITD는 0임 - 즉, 음원이 머리의 앞쪽 정중앙에 위치하고 있음을 의미함
 - $ITD = (a/c)(q + \sin \theta)$
 - a: the head radius
 - c: the speed of sound (~343 m/s)
 - θ : source azimuth
- Interaural intensity differences (IID)
 - 두 귀에 도달하는 소리의 세기 차이
 - 귀에 가까울 수록 고 강도의 소리를 들을 수 있음
 - 고주파 (>1.5kHz) 소리를 감지 가능함
 - 저주파는 ITD에 의해 주로 감지됨

Elevation Cues

- Different reflections
 - 외이의 비대칭으로 인하여 (특히, 귓바퀴), elevation angle 만큼 직접음과 귓바퀴에 반사되어 온 소리의 변화에 차이가 생김
 - 청취자의 머리 위에서 음원이 있다면, 음원이 정면에 있는 것에 비하여 상당히 다른 반사경로로 올것임
- Different amplification (and attenuation)
 - 반사음들 간에 간섭현상에 의해서 발생함
 - 어떤 주파수의 소리는 증폭(amplified)되고 다른 것들은 감쇠(attenuated) 함
- Pinna provides the primary cue for source elevation
 - 청취자의 얼굴과 어깨 형상이 소리가 외이에 도달하게 되는 반사 경로에 영향을 미침

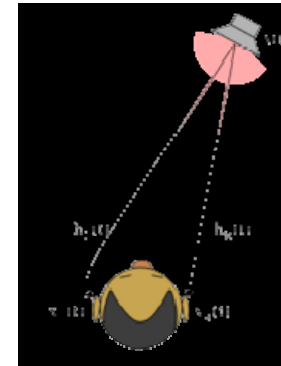
Elevation Cues



Range Cues

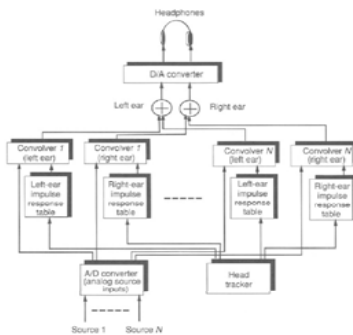
- Perceived loudness
 - 기존에 알려진 음원의 정보를 이용함
 - 희미한 사이렌 소리 (일반적으로, high-energy sound source)는 멀리 있는 것으로 느껴짐
 - 선명한 귀속삭임 소리 (일반적으로, faint sound source)는 가까이 있는 것으로 느껴짐
- Motion parallax
 - 청취자가 움직이면 음원의 azimuth 방향이 바뀌는 현상
 - 큰 motion parallax를 제공한다면 음원이 가까이 있는 것을 의미함
- Ratio between direct and reflected sound
 - 직접음의 에너지는 음원으로부터 거리 (range)의 제곱에 비례하여 감소함
 - 반사음의 에너지는 거리(range)에 따라 큰 변화가 없음

Head-Related Transfer Functions



- HRTF란 음원의 위치정보로부터 모든 물리적 단서를 저장한 것임
- 두 귀가 머리를 사이에 두고 떨어져 있는 사람의 청각 인지 구조 상에서 생기는 소리(주파수) 변화를 함수관계로 나타냄
- 머리전달 함수 실험
 - 구의 형태로 여러 각도에 배치한 스피커로부터 백색잡음과 같은 소리 방사
 - 더미헤드의 귀속에 작은 마이크가 소리측정
 - 양이에 수집된 데이터분석
 - 임펄스 응답 : Head-Related Impulse Responses (HRIRs)
 - 푸리에 변환: Head-Related Transfer Functions (HRTFs)
- 개개인별로 자신만의 HRTF를 가지고 있음 (일명, ear print 라 부름)

Convolvotron



- Crystal River Engineering Inc Beachtron, Convolvotron, Acousticron Audio
- HRTF-based spatial audio system
- 이 시스템은 개인의 HRTF를 기반으로 음원이 3차원 공간 상의 위치변화에 따라 듣는 느낌이 달라질 수 있도록 하는 입체음향시뮬레이션 시스템
- 실내에서 음원 혹은 청취자의 위치 변화에 따라 음량/볼륨 등을 DB화하여 구성된 3차원 오디오 시스템
- Echoes와 room reverberation은 실내 시뮬레이션 모델을 사용하여 추가할 수 있음

References

- http://www.evl.uic.edu/spiff/class/cs426/Notes/Leigh_Sound2005.ppt
- <http://ajou.ac.kr/~tetross/teaching/Sens.Percpt.08.Sound.Hearing.pdf>
- Chiptune music <http://en.wikipedia.org/wiki/Chiptune>