

인공 현실 기술을 이용한 선박 조종 시뮬레이터 구현에 관한 기초 연구

A Basic Research on the Implementation of Ship Handling
Simulator Using Virtual Reality Technology

1997. 5. 10

임 정 빈, 이 상 집**

* 해군사관학교 항해학과 교수

**한국해양대학교 해사대학 해사수송과학부 교수

인공 현실 기술을 이용한 선박 조종 시뮬레이터 구현에 관한 기초 연구

A Basic Research on the Implementation of Ship Handling Simulator Using Virtual Reality Technology

임 정 빈*, 이 상 집**

*해군사관학교 항해학과 전임강사

**한국해양대학교 해사대학 해사수송과학부 교수

요 약

이 논문에서는 가상 현실로 잘 알려진 인간과 컴퓨터 상호 작용에서의 3차원 음장 재생을 위한 요소 기술을 논하였다. 이 연구의 목적은 가상 공간과 같은 가상 환경을 갖는 선박 조종 시뮬레이터의 구현 가능성을 검토하는데 있다. 이 연구에서는 머리 전달 함수(HRTF)를 이용한 3차원 음장 재생에서의 몇가지 핵심 기술을 고찰하고, 필터 탭수를 줄이기 위한 방법과 3차원 음장에서의 불연속 영역을 보간하기 위한 방법을 기술하였다.

ABSTRACT

This paper describes elemental technologies for 3-D sound field reproduction in the human-computer interaction, well known as Virtual Reality. The purpose of this work is to discuss a possibility implementing Ship Handling Simulator with virtual environment as cyberspace. In this work, we explore key techniques to reproduce 3-D sound-field using Head Related Transfer Function's, and then represent two methods that are to reduce the number of filter taps and to interpolate discontinuous area in 3-D sound field.

1. 서 론

선박 조종 시뮬레이터(Ship Handling Simulator, SHS)는 해상에서의 선박 환경을 육상에 임의로 구축하여, 선박의 조종과 운용 및, 적응 훈련을 교육하기 위한 장치이다. 현재까지 개발된 SHS는, 대용량의 화상 데이터를 고속으로 처리하기 위한 컴퓨터, 해상 전경을 표시하기 위한 대형 스크린, 해상의 선박 움직임을 현실감 있게 나타내기 위한 3-축 유압 구동 장치, 이러한 장비를 설치하기 위한 넓은 공간의 건물 및, 다수의 운용 인력으로 구성된다. 또한, 모형 브릿지(bridge) 내부에는 실제의 선박 브릿지와 같은 각종 항해 장비나, 표시 장치 및 해도 등이 전시된다. 따라서, 이와 같은 방식으로 구성되는 SHS를 구입하거나, 운용하기 위해서는 막대한 예산이 필요하게 된다[1].

한편, 최근에는 컴퓨터 기술의 급속한 발전으로 자연계에서 발생하는 환경을 인공적으로 만들 수 있는 가상 현실 시스템(Virtual Reality System, VRS)[2]이 연구 개발되어, 우주선 승조원의 훈련, 건축 설계, 원격 수술, 교육, 오락 등 다양한 분야에 응용되고 있다. VRS는 헬멧 형태의 고글(Goggles)을 피험자가 머리에 쓰고, 두 눈에 전개되는 가상 공간(cyberspace)에서 작업을 하기 때문에 SHS와 같이 대형 스크린이나, 실물 장비 및, 넓은 공간의 건물을 필요로 하지 않는다. 따라서, VRS에 응용된 기술을 이용하여 SHS를 구성하게 되면, 기존 SHS가 갖고 있는 고가, 대형, 다수의 운용 인력 등의 문제점을 해결할 수 있는 새로운 항해 교육 장비가 될 것으로 고려된다. 그리고, 이러한 VRS로 구성된 SHS를 가상 현실-선박 조종 장치(Virtual Reality-Ship Handling Simulator, VR-SHS)라 명칭한다.

이 연구에서는, 현재까지 연구 개발된 VRS의 요소 기술을 응용하여 SHS를 구현하기 위한 기초 연구에 그 목적을 두고, 기존 VRS를 구성하기 위한 기술로부터 VR-SHS를 구성할 수 있는 방법을 검토하였다. 특히, VRS에 관한 연구 분야 중에서 현재까지 기초 단계에 머무르고 있는 3차원 음장 재생 기술에 중점을 두어 고찰하였다.

2. 가상 현실 기술

2.1 생체 감각

가상 현실(Virtual Reality, VR)은 인간이 갖고 있는 모든 감각 기관을 이용하여 자연계에는 존재하지 않지만, 인공계에는 실제로 존재하고 있는 것과 같은 가상의 효과를 만들기 위한 기술이다. 따라서, VR 기술을 개발하기 위해서는 인간이 갖고 있는 생체 감각에 관한 규명이 우선 요구된다. 표1에 인간의 감각을 분류한 표를 나타냈다.

표. 1. 인간 감각의 분류

감각의 대분류	세부 감각
특수한 감각	촉각, 청각, 미각, 후각, 평형감각
피부의 감각	촉압각, 온각, 냉각, 통각
피부 내의 감각	운동각, 위치각, 심부압각, 심부통각
내부 장기의 감각	유기 감각(공복감, 구토증 등), 내장 통증

표.1의 감각 중에서 가장 많은 정보 처리 능력을 갖고 있는 감각은 시각과 청각으로, 전체 감각 정보의 80-90%를 차지하는 것으로 알려져 있다. 따라서, 현재까지의 VR 연구는 주로 시각과 청각을 자극하거나 감지하므로써, 가상 공간을 창출하고 있다. 이러한 인간의 감각을 자극하거나, 감지하기 위한 방법을 살펴보면 다음과 같다.

1) 시각

시각의 감각기는 안구이고, VR과 가장 관련이 큰 시각에 관한 지각 중의 하나는 3차원 시각이다. 인간이 망막에 맺힌 2차원 정보를 이용하여 3차원 공간을 지각할 수 있는 것은, 수정체의 초점 조절, 양쪽 눈의 거리 차에 의한 시차, 망막에 맺히는 상의 크기, 겹쳐짐 등이 원인으로 알려져 있다.

VR에서는 이러한 인간의 시각 감지 현상을 이용하여 2차원으로 표시한 화면을 3차원 화면으로 보이게 할 수 있다. VR-SHS에 이러한 시각 현상을 이용하게 되면, 기존 SHS에서 스크린에 표시되는 2차원 화면을 3차원 화면으로 좀더 현실감 있게 나타낼 수 있다.

2) 청각

청각의 감각기는 두 귀다. 귀의 구조는 크게 나누어서, 외이(external ear), 중이(middle ear), 내이(inner ear)로 구분된다. VR에서 3차원 음장(three dimensional sound field)을 제공할 수 있는 중요한 원인은 컷바퀴에서의 회절과, 중이 및 내이에서의 음에 대한 필터링 특성에 있다. VR에서는 인간의 두 귀에 주목한 머리 전달 함수(Head Related Transfer Function, HRTF)를 이용하여 3차원 음장을 재생하는 방법이 알려져 있다. 여기서, 음장(sound-field)이라는 표현은 음원(sound source)이 존재하는 방향을 지각하는 음상 정위(sound localization)와, 음원이 확산되는 공간의 넓이와 반사 정도 등을 지각하는 공간감(spatial impression)을 모두 포함하는 넓은 의미를 갖는다.

VR-SHS에서 이러한 방법을 이용하게 되면, 선박 내에서 발생하는 소음 및 경보음, 주위 선박에서의 기적(whistle), 호종(bell), 징(gong) 등에 의한 신호음을 3차원 공간에 재생할 수 있다. 또한, 장치가 정상 작동 시에 발생하는 소음과 비정상 시에 발생하는 소음을 3차원 공간에 재생하여 소음 정보로부터 장치의 고장을 판별할 수 있는 교육이 가능하다.

3) 피부감각

피부 감각의 주요 감각은 촉압각이다. 이 감각은 피부 및 피하 조직 내의 비틀림이나 압축, 변형 등의 물리적 자극을 감지하여 지각하게 된다. 촉압각의 검출 한계는 손가락 끝이 가장 민감하다. VR-SHS에서 이러한 피부감각을 이용하게 되면, 조타기를 돌리거나 항해 장비의 스위치를 작동시키며, 물표의 방위를 측정하기 위하여 방위환을 조작하는 등의 가상 체험이 가능하다. 또한, 이러한 가상 공간에서의 행위 동작을 감지할 수 있는 센싱 기술이 필요하다.

4) 기타 감각

시각과 청각 이외의 감각에 대한 연구는 현재 초보 단계에 머무르고 있는 실정이다. 이러한 기타 여러 감각에 대한 규명 및 센싱 기술이 확립된 후에야 VR에 의한 가상 공간 창출이 완벽하게 될 것으로 기대하고 있다. 그러나, 시각과 청각 부분이 정보의 대부분을 차지하고 있기 때문에, 시각과 청각에 주로 의존하고 있는 현재까지의 VR 기술을 이용하더라도 피험자가 실제 상황과 같이 느낄 수 있을 정도의 3

차원 공간 환경 창출이 가능한 것으로 알려져 있다.

2.2 가상 현실 시스템의 구성

VRS의 최초는 1989년 미 VPL사가 발표한 RB2(Reality Built for Two)이다. 현재 VRS는, 미국, 일본, 유럽 등에서 다양한 형태로 연구 개발되고 있고, 국내에서는 시스템 공학 연구소(SERI)의 감성 공학 연구소에서 연구 개발을 추진 중에 있다.

그림 1은 VRS의 구성 예로서, 최근 개발된 VRS의 구성을 참고로 하였다[3]~[5].

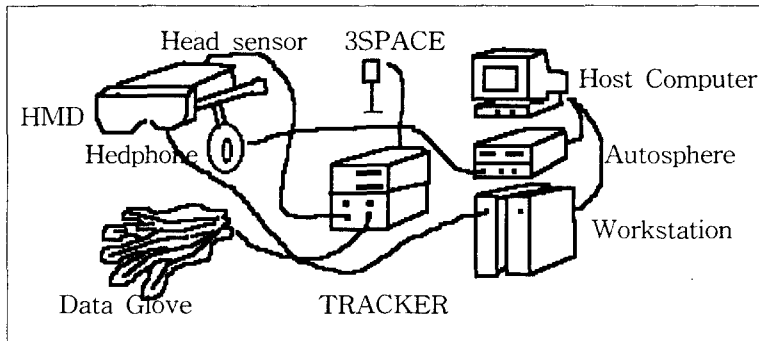


그림 1. VRS의 구성 예.

그림 1의 구성 예를 살펴보면, 컴퓨터에서 출력한 가상 공간을 3차원 입체 영상으로 나타내기 위한 헬멧 형태의 HMD(Head Mounted Display), 손목과 손가락의 동작을 검출하는 Data Glove, 피험자의 위치를 검출하기 위한 3SPACE와 TRACKER, 데이터 처리용의 Host computer, 화면에 처리할 그래픽을 만들기 위한 Workstation, 3차원 음장을 재생하기 위한 Autosphere로 구성되어 있다.

그림 1에서, HMD는 고글(goggle)내에 컬러 LCD를 내장하고 있다. 최근에는 고화질의 소형 CRT를 이용하는 방식도 개발되고 있다. HMD에는 위치 검출용 센서가 부착되어 있기 때문에 머리의 움직임을 검지 할 수 있다. 검지 된 머리의 움직임은 TRACKER라는 위치 검출 장치에서 데이터 처리용 Host computer로 전송되고, Host computer에서 머리 위치에 적합한 화면 정보를 Workstation에 전송하면, Workstation에서는 3차원 화상을 구현하여 HMD의 Goggle에 재생한다.

그림 1에서, Data Glove는 장갑 형태의 자기(magnetic) 센서로 되어 있다. 이 자기 센서는 3SPACE라고 불리는 장치에서 발생하는 자기장을 구동원으로 이용한다. 또한, 손가락 부분에는 손가락의 구부러짐에 따라 휘어지면서 광의 통과 량이 감소되는 광-파이버가 설치되어 손가락의 움직임을 검출한다.

위의 HMD에 부착된 센서에서 검출된 머리의 움직임과, Data Glove에서 검출된 손의 움직임은 TRACKER라는 위치 검출 장치에서 검출하여 데이터 처리용 컴퓨터로 전송된다.

그림 1에서, Audiosphere는 3차원 음장을 재생하기 위한 고속 콘볼루션 연산 장치로 구성된다. Audiosphere에서는 데이터 처리용 컴퓨터에서 제공한 공간 위치 정보를 입력하여 공간 위치에 따른 3차원 음장을 계산한 후, HMD에 부착된 Headphone에 출력한다. 따라서, 피험자는 3차원 화상과 음장을 듣게 되어 가상 현실감을 체험하게 된다.

현재까지의 연구에서, 3차원 화상을 구현하기 위한 장치나 기술 및, 피험자의 움직임임을 검출하는 센서 등에 관한 연구는 3차원 가상 공간을 창출하거나, 감지할 수 있는 수준까지 되어 있다. 그러나, 3차원 음장 재생은, 음이라고 하는 보이지 않는 물리 현상을 취급해야 하는 어려움과, 청각 현상에 대한 인식 과정이 명확히 규명되어 있지 않기 때문에, 그 연구가 초보 단계에 머물고 있는 실정이다. 이 연구에서는 3차원 음장 재생 방법에 관한 요소 기술을 중심으로 검토한다.

2.3 3차원 음장 재생 시의 고려 사항

그림 2는 그림 1과 같이 구성된 VR을 이용하여 SHS를 구성할 때, HMD의 Goggle에 순차적으로 나타내고자 하는 화면의 시나리오 예를 나타낸다.

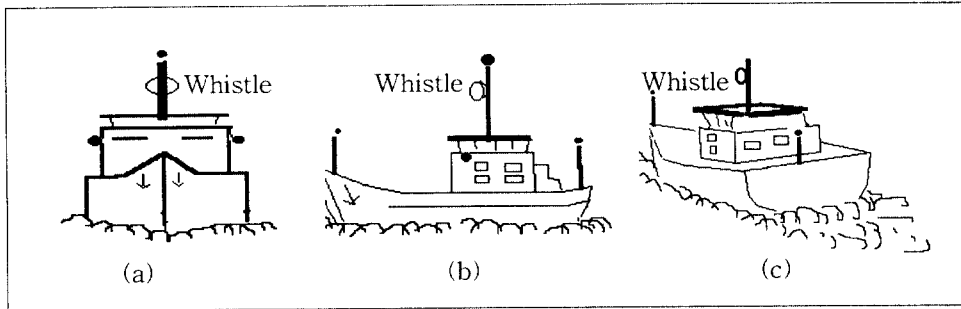


그림 2. VR을 이용한 SHS에서의 화면 구성 시나리오의 예.
본선에서 바라본 상대 선박의 정면(a), 좌측면(b), 후면(c).

그림 2는 본선과 상대 선박이 서로 마주 보면서 좌현 대 좌현(port-to-port)으로 항과 하는 경우를 나타낸 것으로, (a)는 상대 선박의 정면, (b)는 상대 선박의 좌측면, (c)는 상대 선박의 후면을 나타낸다. 그리고, 상대 선박은 선수 방향으로 설치된 1개의 지향성 기적(directional whistle)을 갖고, 연속하여 음향 신호를 울리고 있다.

이러한 조건에서, 그림 2의 (a), (b), (c) 화면을 순차적으로 나타내는 경우, 현실감 있는 가상 환경이 되기 위해서는 상대 선박이 이동하는 방향에서 기적 소리가 청취자에게 연속하여 들릴 것이 요구된다. 이와 같이 3차원 공간에 나타난 물체에 대응하는 음의 재생을 3차원 음장 재생이라 한다.

3차원 음장 재생 방법 중 하나는, 사전에 각 방향에서 녹음한 음을 그대로 물체의 방향에 대응하여 재생하는 방법이 있다. 이 경우, 물체가 이동하는 방향수와 음을 발생하는 물체의 수가 증가하거나, 긴 시간 동안 음을 재생하기 위해서는 방대한 용량의 녹음 저장 공간과 긴 액세스 시간이 필요한 문제점이 있다.

최근에는, 이러한 문제점을 해결하기 위하여 3차원 음장 재생에 있어, 머리 전달 함수(Head Related Transfer Function, HRTF)라 불리는 공간 전달 특성을 이용하는 방법이 연구되고 있다.

3. 가상 현실에서의 3차원 음장 재생

3.1 3차원 음장 재생 원리

그림 3은 3차원 음장 재생 시스템의 기본 구성도이다. 이 시스템은 HRTF 측정 부분과 3차원 음장 재생 부분으로 구분된다.

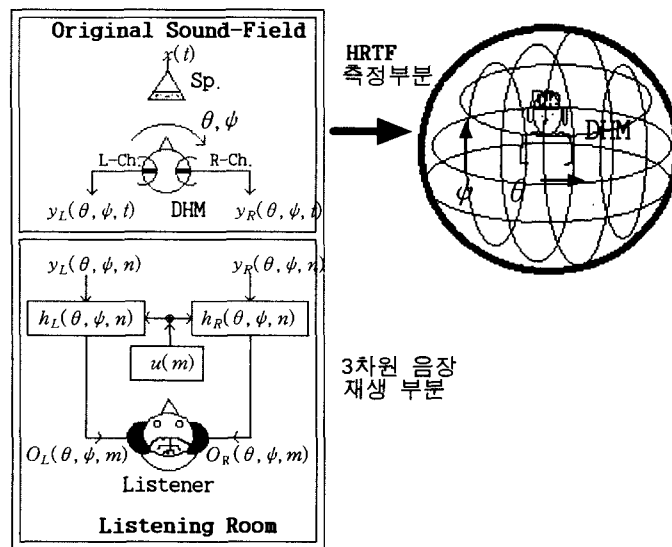


그림 3. 3차원 음장 재생 시스템의 기본 구성도.

3차원 음장을 재생하기 위해서는 먼저, 무향실에서 무방향 특성을 갖는 음을 1개의 마이크로폰을 이용하여 모노(mono)로 측정하거나, 컴퓨터 시뮬레이션으로 모노 음을 합성하여 파일 형태로 저장한다. 이 연구에서는 이와 같이 단일 채널로 측정된 모노 음을 단일 음원 $u(m)$ 으로 명칭 한다.

그림 3의 HRTF 측정 부분에서는, 그림에 나타낸 바와 같이 θ 의 수평면 방향과 ψ 의 수직면 방향으로 구분한 측정 공간에서 의사 머리 마이크로폰(Dummy Head Microphone, DHM)을 이용하여, 구동 스피커(loud speaker)에서의 구동원 $x(t)$ 에 대한 DHM의 왼쪽 출력 신호 $y_L(\theta, \psi, t)$ 과 오른쪽 출력 신호 $y_R(\theta, \psi, t)$ 을 측정한다. 이 신호들을 이용하여 3차원 음장에 이용할 DHM의 왼쪽과 오른쪽 마이크로폰

사이의 HRTF, $h_L(\theta, \psi, n)$ 과 $h_R(\theta, \psi, n)$ ($n=0, 1, 2, \dots, N$ 의 수열 번호)를 구한다. 여기서, DHM은 인간의 머리 형태를 갖는 마네이킹 두 귀의 고막(ear-drum) 위치에 소형 마이크로폰을 좌측과 우측 귀 각각에 삽입한 측정 장치이다. 따라서, DHM을 이용하여 측정된 HRTF, $h_L(\theta, \psi, n)$ 과 $h_R(\theta, \psi, n)$ 에는 θ 와 ψ 방향에 대한 공간 정보가 포함된다.

그림 3의 3차원 음장 재생 부분에서는, $h_L(\theta, \psi, n)$ 과 $h_R(\theta, \psi, n)$ 을 다음 식(1)과 (2)와 같이 음원 $u(m)$ 과 각각 콘볼루션 연산하여, 왼쪽 출력 $O_L(\theta, \psi, m)$ 과 오른쪽 출력 $O_R(\theta, \psi, m)$ 을 재생한 후,

$$O_L(\theta, \psi, m) = \sum_{n=0}^{N-1} h_L(\theta, \psi, n) u(m-n) \quad (1)$$

$$O_R(\theta, \psi, m) = \sum_{n=0}^{N-1} h_R(\theta, \psi, n) u(m-n) \quad (2)$$

여기서, N 은 필터의 탭수이다.

헤드폰을 이용하여 청취자에게 들려준다. 따라서, 식(1)과 (2)의 $O_L(\theta, \psi, m)$ 과 $O_R(\theta, \psi, m)$ 에는 θ 와 ψ 방향에 대한 공간 정보를 갖고 있는 $h_L(\theta, \psi, n)$ 과 $h_R(\theta, \psi, n)$ 의 특성이 포함되므로 청취자는 3차원 공간에서의 θ 와 ψ 방향에 대한 음을 듣게 된다.

위의 식(1)과 (2)에서, 3차원 음장이 정확하게 재생되기 위해서는 $h_L(\theta, \psi, n)$ 과 $h_R(\theta, \psi, n)$ 을 정밀도 높게 측정하는 것이 무엇보다 중요함을 알 수 있다. 그리고, 위의 식(1)과 (2)를 하드웨어로 구현하기 위해, $h_L(\theta, \psi, n)$ 과 $h_R(\theta, \psi, n)$ 의 임펄스 응답은 FIR 필터에 탑재하게 된다. 이 때, 하드웨어 구성을 간단히 하고, 콘볼루션 연산을 빠르게 하기 위해서는 FIR 필터 탭수가 감소될 것이 요구된다. 따라서, θ 와 ψ 방향에 대한 공간 정보의 손실 없이 $h_L(\theta, \psi, n)$ 과 $h_R(\theta, \psi, n)$ 의 수열을 단축할 수 있는 방법이 필요하다.

3.2 필터 탭수의 단축

공간 정보의 손실 없이 $h_L(\theta, \psi, n)$ 과 $h_R(\theta, \psi, n)$ 의 임펄스 응답 수열을 단축하기 위한 하나의 방법으로, $h_L(\theta, \psi, n)$ 과 $h_R(\theta, \psi, n)$ 을 최소 위상 수열로 변환하여 이용한 연구 보고가 있다[6].

그림 4는 참고 문헌[6]의 논문에 발표된, $\theta=45, \psi=0$ 에서 측정된 $h_L(45, 0, n)$ (a)와, $h_L(45, 0, n)$ 을 최소 위상 수열로 변환한 $h_{L\min}(45, 0, n)$ 을 나타낸다.

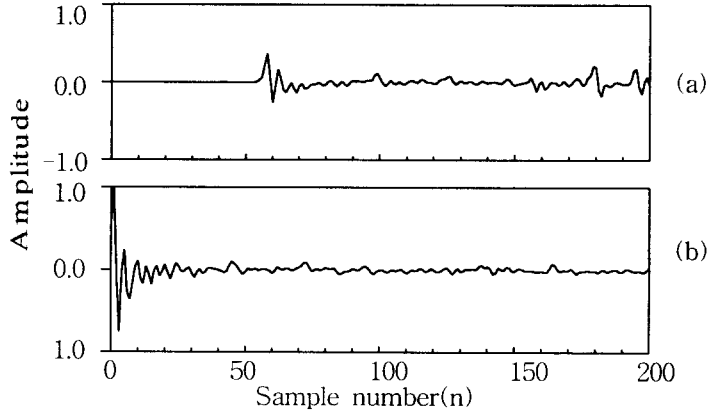


그림 4. $\theta=45, \psi=0$ 에서 측정된 $h_L(45, 0, n)$ (a), $h_L(45, 0, n)$ 에 대한
최소 위상 수열 $h_{L\min}(45, 0, n)$.

그림 4는, $n=4096$ 점으로 측정된 HRTF에서 초기 200 샘플까지만을 나타낸 것이다. 그림 (a)과 (b)를 비교하면, (b)의 $h_{L\min}(45, 0, n)$ 은 초기 $n=0$ 에서 $n=50$ 샘플 부근까지의 지연이 제거되어 수열이 단축되고, $n=0$ 주위에 임펄스 응답 에너지가 집중되어 있다. 여기서, (a)와 (b)의 임펄스 응답은 서로 다른 형태를 갖고 있으나, 주파수 스펙트럼 특성은 동일한 것이다. 그리고, 최소 위상 수열이 초기 $n=0$ 주위에 임펄스 응답의 에너지가 집중되어 있기 때문에, $h_{L\min}(45, 0, n)$ 의 $n=0$ 에서 $n=128$ 샘플 수열까지를 FIR 필터에 이용하더라도 $n=0$ 에서 $n=4096-200$ 까지의 전체 수열을 이용하는 것과 대등한 효과를 낼 수 있다.

최소 위상 수열로 변환함에 따른 HRTF 쌍 사이의 지연 및 위상 특성의 보상 문제는 다음과 같이 두 귀 시간 차(Interaural Time Difference, ITD)를 이용하여 선형적으로 보간 한다.

$ITD(\theta, \psi)$ 는 다음 식(3)과 같이 측정된 HRTF의 왼쪽과 오른쪽 임펄스 응답, $h_L(\theta, \psi, n)$ 과 $h_R(\theta, \psi, n)$ 에 대한 주파수 영역에서의 상호 상관 함수에서 최대 지연 차를 구하고,

$$ITD(\theta, \psi) = \arg \max_n F^{-1}[L(\theta, \psi, j\omega) R^*(\theta, \psi, j\omega)] \quad (3)$$

여기서,

$L(\theta, \psi, j\omega), R(\theta, \psi, j\omega)$: $h_L(\theta, \psi, n), h_R(\theta, \psi, n)$ 에 대한 이산 푸리에 변환.

* : 공액 복소수.

위의 식(3)으로 구한 $ITD(\theta, \phi)$ 는 측정된 HRTF의 두 임펄스 응답, $h_L(\theta_j, \phi, n)$ 과 $h_R(\theta_j, \phi, n)$ 의 지연 정도에 따라 적용한다.

또 다른 방법으로는, $h_L(\theta_j, \phi, n)$ 과 $h_R(\theta_j, \phi, n)$ 을 ARMA(Autoregressive Moving Average) 모델로 변환한 후, $h_L(\theta_j, \phi, n)$ 과 $h_R(\theta_j, \phi, n)$ 이 갖는 공통 특징을 이용하는 방법이다.

측정한 HRTF의 임펄스 응답을 z -변환한 시스템 전달 함수에 대한 ARMA (pole-zero) 모델 $G_{ARMA}(\theta, \phi, z)$ 은 식(4)으로 주어진다.

$$G_{ARMA}(\theta, \phi, z) = \frac{1 + \sum_{k=1}^q b_k(\theta, \phi) z^{-k}}{1 + \sum_{k=1}^p a_k(\theta, \phi) z^{-k}} \quad (4)$$

여기서, k 는 시간 지수(time index), p 는 AR 모델의 차수, q 는 MA 모델의 차수, $a_k(\theta, \phi)$ 와 $b_k(\theta, \phi)$ 는 각각 (θ, ϕ) 에 대한 k 의 AR(p) 계수와 MA(q) 계수.

위의 식(4)은 다음 식(5)과 같이 분모의 $a_k(\theta, \phi)$ 항을 θ 와 ϕ 에 관계없는 a_k 항을 이용하므로써, 필터의 차수를 단축할 수 있다.

$$G_{ARMA}(\theta, \phi, z) = \frac{1 + \sum_{k=1}^q b_k(\theta, \phi) z^{-k}}{1 + \sum_{k=1}^p a_k z^{-k}} \quad (5)$$

이러한 ARMA 모델에서의 차수 단축에 관한 내용은 저자 등[7]의 논문에 상세히 기술되어 있다.

3.3 음장 재생 방식

3차원 음장을 피험자에게 들려주는 방법에는 그림 3에 나타낸 바와 같이 헤드폰을 이용하지만, 스피커를 이용할 수도 있다. 그림 5는 기존 스테레오 재생 계를 그대로 이용하여 2개의 스피커로 재생하는 방식(a)과 헤드폰을 이용하는 방식(b)을 나타낸다.

그림 5(a)에서, 2개의 스피커를 이용하는 경우, 왼쪽 스피커에서의 출력 $O_L(\theta, \phi, m)$ 은 청취자의 왼쪽 귀에만 들리는 것이 아니고, 오른쪽 귀에도 들리는 Cross-talk가 발생한다. 그리고, 오른쪽 스피커에서의 출력 $O_R(\theta, \phi, m)$ 도 청취자의 오른쪽 귀에만 들리는 것이 아니고, 왼쪽 귀에 들리는 Cross-talk가 발생한다. 여기서, 2개의 스피커를 이용한 3차원 음장 재생에서는 왼쪽 스피커에서 발생하는 음장은 청취자의 왼쪽 귀에만 들리고, 오른쪽 스피커에서 발생하는 음장은 청취자

의 오른쪽 귀에만 들릴 때, 원음장에서 DHM을 이용하여 측정했던 것과 동일한 3차원 공간 정보를 느낄 수 있다.

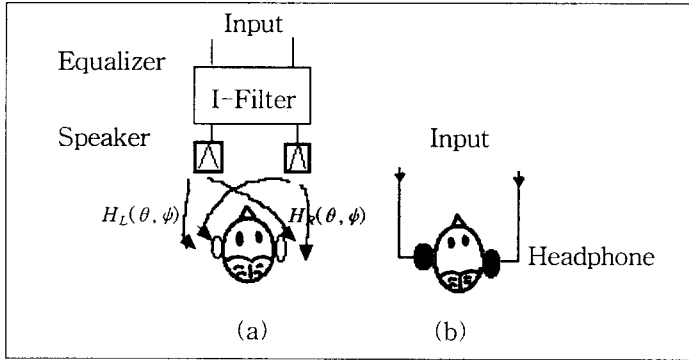


그림 5. 2개의 스피커(a)와 헤드폰(b)을 이용한 3차원 음장 재생.

이와 같은 Cross-talk 를 억제하기 위하여 제안된 하나의 방법은, 그림 5(a)와 같이 2개의 스피커로 음을 재생하기 전에 등화기(equalizer)를 이용하는 기술이 발표되어 있다[8]. 이러한 등화기를 구성하기 위해서는, 스피커에서 귀까지의 공간 전달 함수 $H_L(\theta, \phi)$ 과 $H_R(\theta, \phi)$ 에 대한 역필터, $1/H_L(\theta, \phi)$ 과 $1/H_R(\theta, \phi)$ 이 필요하다. 그러나, 실내 공간에서 측정된 $H_L(\theta, \phi)$ 과 $H_R(\theta, \phi)$ 은 최대 위상 특성을 갖기 때문에 역필터, $1/H_L(\theta, \phi)$ 과 $1/H_R(\theta, \phi)$ 의 구현은 이론적으로 불가능하기 때문에 실제 음장 재생 환경에 적용하지 못하고 있는 실정이다.

그림 5(b)와 같이 헤드폰을 이용하게 되면 공간 전달 함수에 대한 역필터는 필요하지 않다. 그러나, 헤드폰을 이용하는 경우에도, 헤드폰을 착용해야 되는 번거로움과 두 귀에 집중되어 음압이 작용하기 때문에 3차원 음장감을 생생하게 느끼기에는 다소 어려운 문제점이 있으나, 현재의 3차원 음장 재생 기술로는 가장 적합한 방식으로 이용되고 있다.

3.4 재생 음장의 불연속 처리

위의 그림 3에 나타난 바와 같이, HRTF는 $\theta_i (i=1, 2, 3, \dots, L)$ 의 수평면 방향에서 L 개를 측정하고, $\psi_j (j=1, 2, 3, \dots, M)$ 의 수직면 방향을 따라 M 개를 측정하게 된다. 그러므로, θ_i, ψ_j 위치와 θ_{i+1}, ψ_j 위치에서 측정된 HRTF를 이용하여 재생한 3차원 음장 사이에는 불연속 음장 구간이 발생하게 된다. 3차원 음장을 연속적으로 이동하는 경우, 재생 음이 매끄럽게 재생되기 위해서는, 다음과 같이 HRTF (θ_i, ψ_j)과 HRTF (θ_{i+1}, ψ_j)사이의 불연속 구간을 보정하는 방법이 필요하다.

먼저, 위의 그림 3에 나타난 HRTF 측정 시의 θ_i 와 ψ_j 로 공간 분할한 부분 중에서의 한 개의 mesh를 그림 6과 같이 나타낸다.

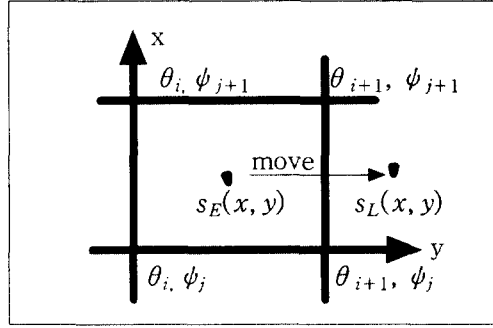


그림 6. HRTF 측정 시의 θ_i 와 ϕ_j 로 공간 분할한 부분 중에서의 mesh.

그림 6에서, 수평면을 따른 2위치, θ_i 와 θ_{i+1} , 수직면을 따른 2위치, ϕ_j 와 ϕ_{j+1} 를 정하고, θ_i 와 θ_{i+1} , ϕ_j 와 ϕ_{j+1} 가 서로 교차하는 4개의 격자점, (θ_i, ϕ_j) , (θ_{i+1}, ϕ_j) , (θ_i, ϕ_{j+1}) , $(\theta_{i+1}, \phi_{j+1})$ 에서의 HRTF를 다음과 같이 정의한다.

HRTF(θ_i, ϕ_j)의 임펄스 응답 쌍: $h_L(\theta_i, \phi_j, n)$, $h_R(\theta_i, \phi_j, n)$

HRTF(θ_{i+1}, ϕ_j)의 임펄스 응답 쌍: $h_L(\theta_{i+1}, \phi_j, n)$, $h_R(\theta_{i+1}, \phi_j, n)$

HRTF(θ_i, ϕ_{j+1})의 임펄스 응답 쌍: $h_L(\theta_i, \phi_{j+1}, n)$, $h_R(\theta_i, \phi_{j+1}, n)$

HRTF(θ_{i+1}, ϕ_{j+1})의 임펄스 응답 쌍: $h_L(\theta_{i+1}, \phi_{j+1}, n)$, $h_R(\theta_{i+1}, \phi_{j+1}, n)$

여기서, $n=0, 1, \dots, N-1$ 이고, N 은 필터 탭수이다.

다음에는, 그림 6에 나타낸 [초기 음원] s_E (첨자 E는 Early 의미) 위치와 주변 4점과의 위치 관계를 정의하기 위하여, (θ_i, ϕ_j) 위치에서 (θ_{i+1}, ϕ_j) 위치 까지를 x 축으로 하고, (θ_i, ϕ_j) 위치에서 (θ_i, ϕ_{j+1}) 위치까지를 y 축으로 하는 $x-y$ 2차원 좌표를 만든다. 이와 같이 구성한 $x-y$ 좌표 내에서 초기 음원 s_E 의 위치를 $s_L(x, y)$ 로 정하고, 이 위치에서 4개 절점 위치까지의 거리를 다음과 같이 정의한 무게 w 로 변환한다.

$w(i, j)$: $s_E(x, y)$ 에서 (θ_i, ϕ_j) 위치까지의 공간 거리.

$w(i+1, j)$: $s_E(x, y)$ 에서 (θ_{i+1}, ϕ_j) 위치까지의 공간 거리.

$w(i, j+1)$: $s_E(x, y)$ 에서 (θ_i, ϕ_{j+1}) 위치까지의 공간 거리.

$w(i+1, j+1)$: $s_E(x, y)$ 에서 $(\theta_{i+1}, \phi_{j+1})$ 위치까지의 공간 거리.

여기서, 무게 $w(i, j)$, $w(i+1, j)$, $w(i, j+1)$, $w(i+1, j+1)$ 각각은 공간 거리에 비례하는 0에서 1까지의 실수로 주어진다.

이러한 무게를 이용한 [초기 음원] $s_E(x, y)$ 위치에서, 주위에 있는 4개의 HRTF를 이용하여 보간된 왼쪽 HRTF, $h_{EL}(x, y, n)$ 과 오른쪽 HRTF, $h_{ER}(x, y, n)$ 은 각각 다음 식(6)과 (7)로 나타낸다.

$$h_{EL}(x, y, n) = h_L(\theta_i, \psi_j, n) \times w(\theta_i, \psi_j) + h_L(\theta_i, \psi_{j+1}, n) \times w(\theta_i, \psi_{j+1}) + h_L(\theta_{i+1}, \psi_j, n) \times w(\theta_{i+1}, \psi_j) + h_L(\theta_{i+1}, \psi_{j+1}, n) \times w(\theta_{i+1}, \psi_{j+1}) \quad (6)$$

$$h_{ER}(x, y, n) = h_R(\theta_i, \psi_j, n) \times w(\theta_i, \psi_j) + h_R(\theta_i, \psi_{j+1}, n) \times w(\theta_i, \psi_{j+1}) + h_R(\theta_{i+1}, \psi_j, n) \times w(\theta_{i+1}, \psi_j) + h_R(\theta_{i+1}, \psi_{j+1}, n) \times w(\theta_{i+1}, \psi_{j+1}) \quad (7)$$

다음에는, 그림 6에 표시한, [다음의 음원] s_L (첨자 L은 Late 의미)에 대한 위치를 $s_L(x, y)$ 로 정하고, 위의 식(6)과 식(7)을 구하는 과정을 반복하여 $s_L(x, y)$ 위치에서의 왼쪽 HRTF, $h_{LL}(x, y, n)$ 과 오른쪽 HRTF, $h_{LR}(x, y, n)$ 을 구한다.

이와 같은 보간에 의하여 구한 [초기 음원] 위치에서의 HRTF, $h_{EL}(x, y, n)$ 과 $h_{ER}(x, y, n)$, [마지막 음원] 위치에서의 HRTF, $h_{LL}(x, y, n)$ 과 $h_{LR}(x, y, n)$ 을 이용하여 하드웨어를 구현할 때는 다음 절차를 따른다.

그림 7과 같이 [초기의 음원] $s_E(x, y)$ 를 출력할 때의 시각에서 [다음의 음원] $s_L(x, y)$ 를 출력할 때까지의 시각을 고려하여, 이 시각을 $(N-1)$ 개로 분할한다(여기서, N 은 필터의 탭수).

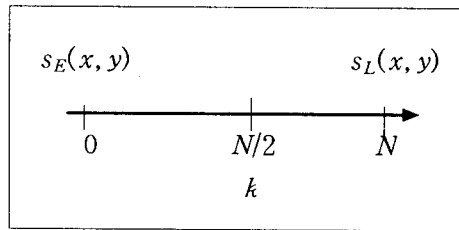


그림 7. [초기의 음원] $s_E(x, y)$ 와 [다음의 음원] $s_L(x, y)$ 과의 시각 관계.

다음에는, 시간을 나타내는 파라미터 $k(k=0, 1, 2, \dots, N)$ 를 분점의 하나로 하고, 각 분점에서의 HRTF 쌍, $h_{ELL}(n, k)$ 과 $h_{ELR}(n, k)$ 를 다음 식(8)과 (9)와 같이 나타낸다.

$$h_{ELL}(n, k) = \frac{N-k}{N} \times h_{EL}(x, y, n) + \frac{k}{N} \times h_{LL}(x, y, n) \quad (8)$$

$$h_{ELR}(n, k) = \frac{N-k}{N} \times h_{ER}(x, y, n) + \frac{k}{N} \times h_{LR}(x, y, n) \quad (9)$$

식(8)과 (9)가 VR에서 음을 3차원화할 때의 기본 식이 된다. 따라서, 시간 파라미터 $k(k=0, 1, 2, \dots, N)$ 에 따라 보간된 $h_{ELL}(n, k)$ 과 $h_{ELR}(n, k)$ 을 이용하여 음을 보간할 수 있기 때문에 머리와 음원의 상대 위치가 연속하여 변할 때, 보다 매끄럽게 음을 이동시키면서 출력할 수 있다. 음원 $x(n)$ 에 대한 k 분점에서의 왼쪽 출력 $L(n)$ 과 오른쪽 출력 $R(n)$ 은 다음 식(10)과 (11)과 같이 된다.

$$L(n) = \sum k(h_{ELL}(k, n) x(n-k)) \quad (10)$$

$$R(n) = \sum k(h_{ELR}(k, n) x(n-k)) \quad (11)$$

여기서, 우측 항의 $\sum k$ 는 k 에 관한 합을 나타내고, 첨자 $(n-k)$ 가 음의 수로 될 때는, 시계열적으로 $x(0)$ 앞에 샘플링된 데이터를 이용한다.

4. 고 찰

VR 기술은 인간의 생체 감각을 모두 이용하기 때문에 여러 분야에서의 요소 기술들이 유기적으로 연계되어야 한다. 그러나, 아직까지 VR 기술 전체에 대한 체계적인 정리가 되어 있지 않기 때문에 VR-SHS 구현까지는 많은 연구와 시간을 필요로 한다. 특히, 이 연구에서 중점적으로 검토한 3차원 음장 재생 분야에서는 다음과 같은 연구가 필요하다.

1). HRTF와 원음을 콘볼루션 연산하기 위한 기존의 장치는, 필터 탭수가 제한되어 있기 때문에 다수 음원의 계산이나, 긴 임펄스 응답의 처리에는 한계가 있다. 그러므로, 콘볼루션 연산 장치의 탭수를 증가하기 하드웨어의 개선과, HRTF의 임펄스 응답을 단축할 수 있는 알고리즘 및, 소프트웨어의 개발이 필요하다.

2). 기존에 개발된 콘볼루션 연산 장치는 시뮬레이션 할 수 있는 음원의 수가 한 개로 제한되어 있고, HRTF는 직접 전달 특성만을 갖는 짧은 임펄스 응답을 이용하기 때문에 공간 정보를 현장감 있게 재생하기에는 부족하다. 따라서, 반사파, 회절 현상, 도플러 효과 등을 이용하여 현장감을 증가하기 위한 연구가 요구된다.

3). 현재의 3차원 음장 재생에는, 2개의 스피커를 이용하거나, 헤드폰을 이용하는 방법이 사용되고 있다. 그러나, 인간은 두 귀를 이용하여 소리를 들을 뿐만 아니라 머리를 울리는 진동에 의해서도 소리를 듣고 있다. 따라서, 이러한 인간의 청감 특성을 분석하는 심리 음향 분야에 관한 연구도 필요하다.

4). 3차원 음장 재생에서 HRTF 측정은 무엇보다 중요하다. 현재 HRTF는 짧은 임펄스 응답을 얻기 위하여 그리고, 일반 실내에서는 반사파의 영향으로 측정한다

HRTF에 왜곡이 발생하고, 재생 음의 명료도가 저하되는 문제점이 있기 때문에 주로 무향실에서 측정하고 있다. 무향실에서 측정한 HRTF로부터 3차원 음장을 재생하게 되면, 실제의 실내 환경과는 다른 음장감을 느끼게 한다. 따라서, 일반 실내에서 HRTF를 정밀도 높게 측정하기 위한 연구도 필요하다.

5. 결 론

이 연구에서는 가상 현실 기술을 이용하여 선박 조종 시뮬레이터를 구현하기 위한 방법과 시스템의 구성 방법 및, 가상 현실-선박 조종 시뮬레이터 구성에 요구되는 사항 등을 검토하였다. 특히, 아직까지 요소 기술이 부족한 3차원 음장 재생에 관하여 집중적으로 검토하고, 몇 가지 해결 방안을 제시하였다.

3차원 음장 재생 기술은 시각 분야에서의 기술과는 달리, 연구 개발이 미흡한 실정임을 고려할 때, 이 연구에서 검토하고 제안한 3차원 음장 재생에 관한 연구는 가상 현실 기술을 응용한 선박 조종 시뮬레이터 구현에 기여할 수 있을 것으로 생각된다.

앞으로 이 연구는, 선박에 대한 3차원 애니메이션을 제작한 후, 이에 적합한 3차원 음장을 재생하는 실험에 적용할 예정이다.

참고문헌

- [1]. Pamphlet of ATLAS Elektronik GmbH, 'Training Equipment for Nautical Ship-Handling,' 1992
- [2]. G. Bylinsky, "The Marvels of Virtual Reality," *Fortune*, pp.94~100, June 3, 1991.
- [3]. M. Bajura, H. Fuchs, and R. Ohbuchi, "Merging Virtual Objects with in Real World," *Computer Graphics*, Vol. 26, No. 2, pp.203~210, July 1992.
- [4]. 임정빈, 김천덕, 강성훈, "음장합성 시스템을 위한 머리전달함수의 효율적인 저차 FIR 모델링," *한국음향학회지*, 제15권, 제4호, pp.18~27, 1996.
- [5]. A. Stettner and D. P. Greenberg, "Computer Graphics Visualization for Acoustic Simulation," *Computer Graphics*, Vol. 23, No. 3, pp.195~206, July 1989.
- [6]. S. S. Fisher, E. M. Wenzel, C. Coler and, M. W. McGreevy, "Virtual Interface Environment Workstations," *Proc. of the Human Factors Society 32nd Annual Meeting*, pp.91~96, 1988.
- [7]. J. B. Yim, C. D. Kim and S. H. Kang, "Lower-order ARMA Modeling of Head-Related Transfer Functions for Sound-Field Synthesis System," *J. Acoust. Soc. Korea*, Vol.15, No.3(E), pp.35~41, 1996.
- [8]. J. B. Yim, S. H. Kang and C. D. Kim, "Approximations of FIR Inverse-filter in OSS Equalizer by Median Moving Average," *WESTPRAC-V 1994 Conf. Proc.*, pp.96~99, 1994.