

가속도 센서를 이용한 지휘 동작 인식 시스템

손동관¹, 이희승², 노영해³, 원광연⁴, 구본철⁵
KAIST 문화기술학제전공¹, KAIST 전기및전자공학전공²,
KAIST 인문사회과학부³, KAIST 문화기술대학원^{4,5}
{itsdike¹, lee.h.s², younghae³, wohn⁴, mgtech⁵}@kaist.ac.kr

The Conducting Motion Recognizing System Using Acceleration Sensors for the Virtual Orchestra

Dong Kwan Son¹, Hui Sung Lee², Young Hae Noh³,
Kwang Yun Wohn⁴, Bon Cheol Goo⁵
Culture Technology Program, KAIST¹, Electrical Engineering, KAIST²,
School of Humanities & Social Sciences, KAIST³,
Graduate School of Culture Technology, KAIST^{4,5}

요약

음악은 소리를 즐긴다는 뜻을 담고 있다. 감상자에게 단순한 청각적 자극을 넘어 즐거움을 주기 위해선 음악적인 경험이 뒷받침되어야 한다. 가상 현실을 이용한 사용자와 시스템 간의 상호작용을 음악 경험 제공에 접목하려는 시도는, 새로운 경험을 통해 일반인들이 보다 쉽게 음악을 접하고 체험함으로써 음악을 통해 즐거움을 얻을 수 있도록 도움을 주는 데에 그 목적이 있다. 가상 오케스트라를 구현하고 지휘 동작을 재현하는 것은 이러한 가능성을 극대화하는 연구이다.

본 논문에서는 가상 오케스트라를 구현하기 위해 필수적인 중간 단계로, 사용자의 지휘 동작을 감지하여 연주의 박자(속도)를 제어하는 지휘 시뮬레이션 시스템을 제시한다. 실제의 지휘 동작을 분석하고, 동작의 변화를 인식하기 위하여 가속도 센서를 이용, 공간상에서 지휘봉의 움직임을 가속도 정보로 수집하여 이에 상응하는 박자의 제어를 구현한다. 사용자의 박자 명시에 따라 변화하는 상하 방향의 가속도를 센서를 통해 전압 신호로 입력 받고, DSP의 A/D conversion 모듈에서 디지털 신호로 변환, 일정 수준 이상의 신호를 박자 정보로 직렬통신을 통해 컴퓨터에 전달한다. 컴퓨터에서는 Max/MSP를 이용하여 각 박자 사이의 시간 간격을 측정하고 상응하는 MIDI 음악을 재생하는 방식으로 시스템이 구현된다. 기존 연구에서 사용된 CCD 카메라에 의한 Motion Tracking을 보완하여 동작의 크기에 따라 음량을 조절한다. 본 논문에서 제시되는 시스템은 지휘 동작에서 가장 특징적으로 나타나는 상하 방향의 급격한 가속도 변화를 직접 입력 받기 때문에 기존 시스템에 비해 지휘 동작의 인식 성공률을 높일 수 있으며, 화상 처리 및 계산에 의한 지연을 최소화할 수 있다. 또한, 장치의 규모를 소형화하여 보다 지휘봉의 형태에 가까운 인터페이스를 제공하며, 적합한 응용 콘텐츠를 접목할 경우 게임 컨트롤러로의 발전 가능성이 있다.

Keyword: 가상 오케스트라, 가상 지휘, 가속도 센서 응용, Max/MSP, 3차원 위치 추정

1. 서론

컴퓨터는 가상 현실을 통해 현실을 모사하거나 오히려 더욱 이상적인 현실을 창조하여 실제보다 더 아날로그적인 경험을 인류에게 제시하고자 한다. 컴퓨터에 의해 창조된 세계는 단순히 그 자

체만으로 존재하기도 하지만, 무엇보다도 인간과의 상호작용을 통해 작동하고 의미를 부여 받게 된다. 시각과 청각을 넘어 촉각과 후각, 미각까지 포함하는 오감을 재현하고자 하는 연구는 이러한 궁극적인 목표를 달성하기 위한 일련의 과정이다.

실재하는 세계 그 이상의 것을 창조하여 인류에게 지금까지와는 전혀 다른 경험을 제공함으로써, 가상 현실에 의해 증가된 실재는 가상과 실제의 상호 변환을 보다 유연하게 조절할 수 있는 가능성을 지니고 있다.

음악은 예술의 한 갈래로서, 인류가 탄생한 이래로 고대로부터 사람들 간의 커뮤니케이션 수단인 하나였다. 음악(音樂)이라는 말은 그 자체가 소리를 즐긴다는 뜻을 지니고 있으며, 감상자에게 단순한 청각적 자극을 넘어선 즐거움을 주기 위해서는 무엇보다도 감상자 스스로가 음악을 자주 듣고 접해야 한다. 한 가지 곡을 똑같이 들어도 그것을 듣는 사람들의 반응이 각각 다른 것은 각자 이전의 음악 경험의 폭과 질에 연유되기 때문이다. 음악이 의미 있고 아름답게 들리려면 우선 음악 작품 자체가 의미와 아름다움을 내포하고 있어야 할 뿐만 아니라, 청취자가 그 음악의 깊이를 느낄 수 있을 만큼 음악적인 경험과 소양을 충분히 갖추어져 있어야 한다. 이를 바탕으로 음악을 이해하는 양상에 따라 음악이 주는 값진 쾌락과 정신적인 충족감, 감동과 만족의 질이 결정된다.

현대의 오케스트라는 합주의 한 형태로서 현악기와 관악기, 타악기 등으로 조직된 합주이다. 오늘날 오케스트라는 악단의 핵심적인 역할을 하고 있으며, 음악의 최고 형식이라 할 수 있는 교향곡은 오케스트라가 바로 그 주체이다. 오케스트라 공연을 통해서 감상자들은 다양한 악기와 형식에 대한 폭넓은 이해와 인상적인 음악 경험을 하게 된다.

가상 현실에서 벌어지는 사용자와 System 간의 상호작용은, 키보드나 마우스에 그치지 않고, 직관적이고 실제적인 사용자의 직접 입력에 반응하는 것을 목표로 한다. 이러한 System 은 수동적으로 콘텐츠를 수용해야 하는 System 에 비해 새로운 경험에의 몰입도를 높일 수 있다. 또한 새로운 형식과 색다른 경험을 통해 콘텐츠의 학습 효과도 배가시킬 수 있다. 기본적인 지식만으로 작동할 수 있도록 가상 현실을 통해 음악 콘텐츠를 제공하게 되면 이러한 장점들을 모두 취할 수 있으며, 감상 활동 이상의 연주 활동 참여를 통해

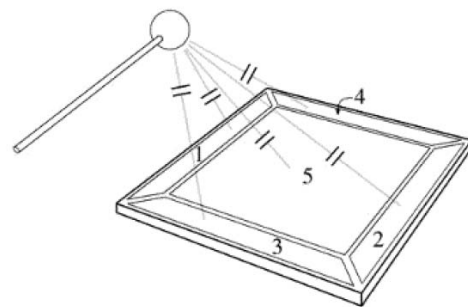
음악 경험의 극대화를 꾀할 수 있다.

본 연구에서는 가상현실 환경에서 실재감 있는 Virtual Orchestra 를 구현하기 위한 중간 단계로, 사용자의 지휘 동작을 감지하여 연주의 Tempo 와 Volume 을 제어하는 Conducting Simulation System 을 설계 및 구현한다. 이를 통해 일반인들의 음악에 대한 이해를 돕고 흥미를 유발하며, 새로운 몰입 경험을 통해 보다 쉽게 음악 경험을 할 수 있도록 도움을 줄 수 있는 가능성에 대해 고찰하고자 한다. 특히 본 연구에서는 사용자의 행동을 인식하는 부분에 중점을 둔다.

2. 관련 연구

2-1. Radio Baton & Improvisation Modes (1989) [1]

Max Mathews 가 1989 년 발표한 것이 Radio Baton 으로, 안테나가 달린 네모난 금속 판 위로 일정한 주파수(50kHz)를 송출하고 있는 봉을 움직이면 5 개의 안테나가 capacitance 를 측정하여 봉과의 거리를 비교하고 이를 통해 매 4 초마다 3 차원 위치 정보를 보내게 된다(그림 1). 단, Z 축 방향으로로는 금속 판에서 멀어질수록 정확도가 떨어지게 된다.



[그림 1] Radio Baton

일정 레벨의 가상 Z 좌표를 설정하고 이 이상으로 봉이 올라가면 한 번씩 trigger 를 보내게 되는데, trigger 를 받으면 시스템에 미리 넣어둔 연주정보를 발생하게 하고, 움직인 속도에 따라 dynamics 를 조절하고, 봉의 위치에 따라 밸런스 와 음색을 조절한다. 연주 정보는 MIDI 데이터 형식으로 미리 입력되어 있다.

2-2. Computer Music System that Follows a Human Conductor (1989) [2]

Hideyuki Morita, Shuji Hashimoto 와 Sadamu

Ohteru 가 1989 년 발표한 첫 번째 버전에서는 CCD 카메라와 영상 추출 장치를 이용하여 지휘봉 끝에 달린 하얀 marker 와 지휘자가 왼손에 착용하고 있는 하얀 장갑의 2 차원 궤적을 추적하고 이 정보를 컴퓨터로 보낸다. 컴퓨터는 궤적에서 Y 축 방향의 상한 전환점과 하한 전환점을 찾아내고 이를 통해 박자와 볼륨 정보를 생성하게 된다. 이듬해에 나온 버전에서는 지휘봉의 끝에 적외선 발광 소자를 부착, 적외선 필터가 달린 CCD 카메라로 궤적과 속도, 가속도를 추적한다. 또한 왼손의 움직임을 얻기 위해서 VPL Research 사의 Data Glove 를 착용하게 된다. 왼손의 움직임과 손의 모양은 Data Glove 를 통해 컴퓨터로 전달되어 악기 섹션을 고르거나 특정한 음악적 표현을 지시하게 된다. 지식 기반 데이터베이스를 바탕으로 얼마나 연주가 잘 되었는지를 자체적으로 평가하기도 한다. 연주는 두 버전 모두 MIDI 시퀀서와 MIDI 인터페이스를 사용하였다.

2-3. You're The Conductor: A Realistic Interactive Conducting System for Children (2003) [3]

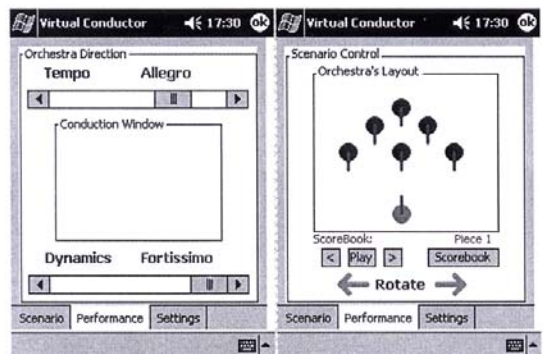


[그림 2] You're The Conductor
(보스턴 어린이 박물관)

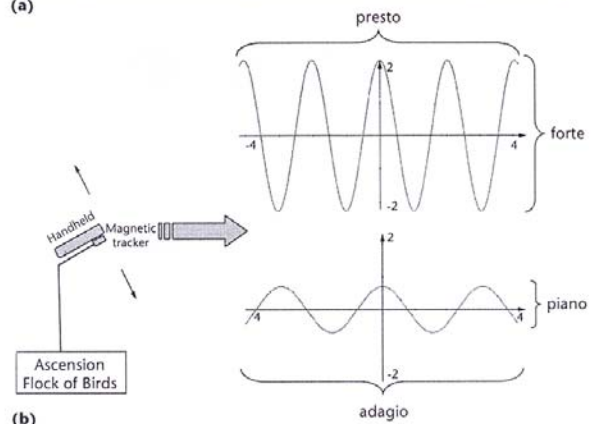
2003 년 6 월, 미국 보스턴의 어린이 박물관에서 열린 “Making America’s Music: Rhythm, Roots & Rhyme” 展에서 전시된 이 시스템은, 주요 사용자가 낮은 연령층으로 한정되어 있으므로 음악 경험이 거의 없는 사용자의 non-professional 한 지휘 동작을 감지하여야 하며, 쉽게 손상되지 않는 견고하고 단순한 구조가 요구되었다. 이에 따라 충격에 민감한 여러 센서들을 배제하고 지휘봉의 끝에 infrared 발광 소자를 부착하여 전방 스크린 밑

에 설치된 적외선 필터 카메라를 통해 지휘봉의 위치 정보를 얻어냈다. 이 카메라는 약 1.5m 높이 근처 ± 60 도의 범위를 촬영하게 되며, 내장된 2 차원 PSD(position-sensitive detector)를 통해 infrared 발광 소자를 추적한다. PSD 에서 나온 신호는 카메라 뒤에 부착한 신호 처리용 회로로 보내져 XY 좌표와 움직이는 infrared 의 명암을 추출하게 된다. 이 아날로그 신호는 호스트 컴퓨터로 다시 전송되어 디지털 신호로 바뀐다. 호스트 컴퓨터에서는 간단한 계산으로 지휘봉의 속도를 계산하고, 여기에 약간의 보정을 더해 연주 데이터의 tempo 를 결정한다. 연주가 지나치게 빨라지거나 느려져서 부자연스러운 소리가 재생되는 것을 방지하기 위해 보정을 가한다. 또한 X 나 Y 값의 변화가 없으면 급격히 tempo 를 0 으로 감소시킨다. 카메라의 촬영 범위 밖으로 지휘봉이 나갔을 때는 1 초 이내에 다시 영역 내에서 감지될 경우 가상의 궤적을 계산하고, 1 초 이상 영역 밖에 머무를 경우 변화가 없는 것으로 간주, tempo 를 0 으로 감소시킨다.

2-4. Conducting a Virtual Orchestra (2004) [4]



(a)



(b)

[그림 3] Virtual Conductor 의 2D GUI 와 변환 과정

2004 년 July-September IEEE MultiMedia 에 발

표된 이 시스템의 목적은 음악 교육이나 경험이 적은 사람들이 가상의 연주자를 직접 지휘해볼 기회를 제공하고 새로운 멀티미디어 경험을 체험하게끔 하는 데에 있다. 이 연구에서 주안점으로 둔 것은 3D Virtual Reality 를 극대화하기 위한 visual 요소의 개발 및 배치와 3D sound 의 구현이다. 우선 visual 측면에서, 사용자에게 몰입감을 주기 위해 대형의 projection 스크린을 사용하였고, 여기에 animated virtual flutist character 를 개발, 연주에 따라 character 의 skeleton 을 움직이게끔 했다. 이러한 요소들을 조정하는 user interface 는 PPC 기반의 PDA 에 담겨 main system 과 TCP/IP 로 통신하게 된다. 번거롭거나 복잡한 device 를 피하기 위해 선택된 PDA 에서는, 2D 의 GUI 를 통해 플루트 연주자들의 배치를 조정하거나, 지휘자의 위치를 바꿔 영사되는 화면의 시점을 변화시키고, 가상 연주 장소의 특성을 조정해 3D sound(소리의 방향)를 변화시킨다. 또한 tempo(largo, adagio, default, allegro, presto)와 dynamics(pianissimo, piano, default, forte, fortissimo)를 정해주며, 스타일러스 펜으로 화면의 정해진 영역을 클릭하면 이를 박자로 변환한다. 이때, 시스템은 클릭의 시간 간격을 측정하여 preset 된 다섯 가지의 tempo 중 가장 유사한 것으로 조정한다. 클릭을 멈추면 가장 마지막으로 계산된 박자를 적용하게 된다. 여기에 사용자의 행동 정보를 받아들이기 위해 magnetic tracker 를 PDA 의 하단 면에 부착하여 손목 움직임의 크기와 빈도를 측정해 또 하나의 보조 컴퓨터(gestures analyzer)로 보내고, 보조 컴퓨터는 변위 값들의 변화로부터 amplitude 와 frequency 를 계산하여 다시 main system 으로 TCP 를 통해 tempo 와 dynamics 정보를 보내게 된다.

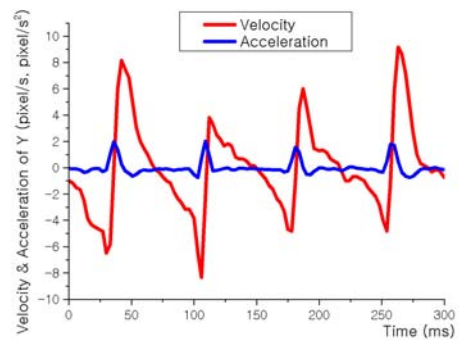
3. 연구 내용 및 결과

본 장에서는 지휘와 지휘 동작에 대한 음악적 요소 및 동작 요소를 분석하여 시스템이 처리해야 하는 factor 를 결정하고, 이로부터 Computer-Based Virtual Orchestra System 의 모델을 설계, 본 연구에서 구현하게 될 범위를 설정한다. 또한 구현되는 시스템의 구체적인 설계와 실제 구현 과정, 결과

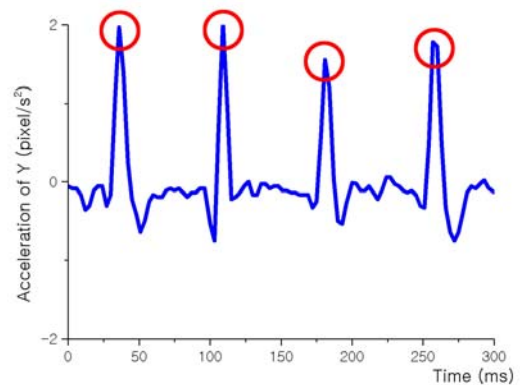
물에 대해 설명한다.

3-1. 지휘 동작의 분석

지휘 동작에서 나타나는 특징적인 요소를 추출하기 위해 직접 전문 지휘자의 지휘를 촬영하고 이를 분석한다. 이상적인 4 분의 4 박자 지휘에서는 4 번의 방향 전환이 이루어진다. 지휘 시연에는 다트오케스트라 음악감독 겸 상임지휘자 윤성규 선생님과 KAIST 문화기술대학원 컴퓨터음악 초빙 교수 구분철 교수님께서 참여해 주셨다. 기본적인 4 분의 4 박자 지휘 8 마디를 100bpm 내외의 빠르기로 지휘하였으며, DV 캠코더로 초당 30 frame 촬영하였다. 지휘 동작을 정면에서 촬영하였을 때 정해지는 영역을 2 차원으로 규정하고, 지휘봉 끝에 붉은 색 marker 를 부착하여 frame 별로 궤적의 XY 좌표를 추출하였다.



[그림 4] Y 방향의 속도와 가속도 변화

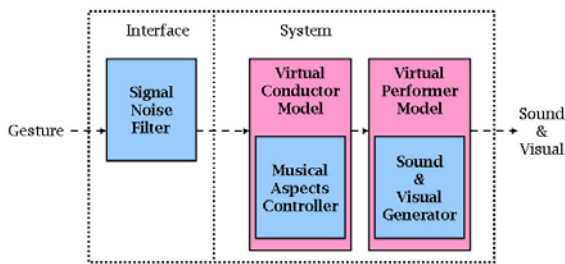


[그림 5] Y 방향의 가속도 변화

0.3 초 간격으로 얻어진 픽셀에 해당하는 XY 좌표를 각각 OriginPro6.1 프로그램에 입력한 뒤 Differentiate Analysis 계산 도구로 미분하여 0.3 초 간격의 속도를 계산하고, 이 값을 다시 한번 미분하여 0.3 초 간격의 가속도를 계산하였다. 분석에

따르면 두 실험자의 지휘에서 모두, 약간의 시간 차이가 존재하지만, X 와 Y 방향의 궤적과 속도와 가속도의 변화에서 유사한 양상으로 진행된다.(그림 4) Y 방향으로서는 아래에서 위로 각 박자마다 네 번의 급격한 방향 전환이 이루어지며, 특히 이 때 가속도에서 불연속점이 관찰된다. 그림 5 와 같이 4 개의 peak 을 확인할 수 있다. 이로부터 지휘 동작에서 박자를 적절하게 얻어내기 위해 지휘봉 끝의 가속도 변화를 측정하여 박자의 명시를 인식하는 방법을 제시할 수 있다.

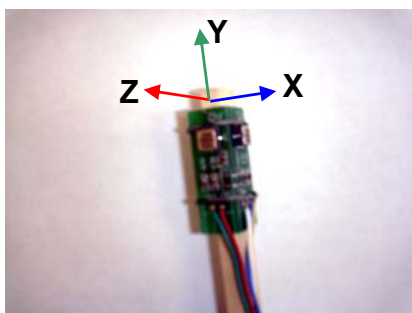
3-2. 시스템의 설계



[그림 6] Virtual Orchestra 의 개념 모델

Virtual Orchestra System 의 개념 모델을 정의하고 본 연구에서 구현하게 될 시스템을 설계한다. 개념 모델에서는 크게 하드웨어로 구성된 Interface 와 소프트웨어로 구성된 시스템으로 나뉘게 된다. 센서 혹은 카메라 등의 하드웨어를 통해 들어오게 될 신호를 정제하고, 시스템은 Virtual Conductor Model 에서 이 신호로부터 박자와 볼륨 등의 음악 정보를 추출, MIDI 나 Wave 음원의 요소를 제어할 수 있는 신호로 전환된다. 전환된 신호는 Virtual Performer Model 로 전달되어 음악을 재생하고 오케스트라의 영상을 출력한다. 본 연구에서는 가속도 센서를 사용하여 박 beat 의 신호를 받아들여 tempo 를 제어하는 시스템을 제시한다.

3-3. 시스템의 구현



[그림 7] 가속도 센서 ADXL203, Analog Devices 社

3 축의 가속도 정보를 60Hz, 1mg 의 분해능으로 0.1 도 단위로 받아들인다. 이 센서를 지휘봉의 끝에 부착하고 좌표를 그림 7 과 같이 지휘봉을 기준으로 첫 번째 센서가 붙어있는 면에 수직하는 방향이 Z 축, 두 번째 센서가 붙어있는 방향이 X 축, 지휘봉을 연장하는 축이 Y 축으로 설정한다. 지휘자가 이 지휘봉을 들고 있을 경우 Z 축이 상하, X 축이 좌우, Y 축이 정면을 향하도록 한다. 지휘봉은 센서의 부착을 용이하게 하기 위하여 직육면체 형의 나무 막대(9x4x355mm)를 사용하였다.

각 박 beat 에 상응하는 신호를 한번씩 컴퓨터로 보내기 위해 센서의 threshold 를 2.5V 로 정하고, 세 개의 mode 를 설정하여 측정된 값을 검사하고 신호를 발생한다. 지휘 동작 분석으로부터 박 beat 를 명시할 때 상하 방향으로 발생하는 가속도의 급격한 변화를 인식하게 된다. Mode0 은 박 beat 의 명시가 되지 않은 상태로, 2.5V 가 넘는지를 검사하고 넘으면 mode1 로 전환한다. Mode1 은 정상적으로 박 beat 의 명시가 이루어졌는지를 알기 위해 saturation 을 검사하고, 3~5 회 이상 일어나면 packet 을 전송하고 mode0 으로 전환하며, 3 회 이상 일어나지 않고 2.5V 이하로 전압이 감소할 경우 mode2 로 전환한다. Mode2 는 비정상적인 박 beat 의 명시가 입력되는 상황으로, 손 떨림 등을 보정한다. mode1 에서 방금 벗어난 mode 가 다시 mode1 로 전환되지 않도록 하고, 2.5V 이하로 감소하면 mode0 으로 전환한다.

박 beat 에 해당되는 packet 은 RS232 시리얼 포트를 통해 컴퓨터로 전송되며(\$\$0000#), 이 값은 Max/MSP 프로그램에서 ASCII 로 처리되어 MIDI 를 재생하는 부분으로 신호를 넘겨주고, 이 신호에 의해 해당되는 박 beat 의 첫 음이 연주되며, 각 신호 사이의 시간을 측정하여 tempo 를 정하게 된다. i 번째 입력 신호 S_i 가 timer 에 start 명령을 내리고, $i+1$ 번째 입력 신호 S_{i+1} 이 timer 에 stop 명령을 내린다. 여기서 구해진 시간이 i 번째 박 beat 의 길이 length, T_i 이다. 여기서 얻어진 T_i 는 다음 박 beat 의 reference 역할을 하게 된다.

4. 제안 시스템의 성능 평가

본 연구에서 고려 대상이 되는 박 beat 의 정확한 입력을 정량적으로 측정한다. 오케스트라에서 주로 사용되는 4 분의 4 박자 tempo 를 지니고, 곡이 진행되는 중에 속도 변화가 없는 곡을 선정하여, 사용자에게 기본적인 4 분의 4 박자 지휘를 수행하게 한다. 본 평가에서는 bpm 약 90 으로 진행되는 16 마디의 “애국가” 를 이용하여, 64 회의 박 beat 의 입력 여부를 확인한다. 전문 음악 교육을 받지 아니하고 대학 이상의 교육을 받은 무작위로 선정된 20 대 남녀 10 인의 일반 사용자에게 4 분의 4 박자의 지휘 그림을 보여주고, 각각 3 회 (bpm60: 1 박/sec, bpm90: 1 박/0.67sec, bpm150: 1 박/0.4sec) 반복하여 각 bpm 별로 10 회, 각 박자 별로 480 회, 총 박 beat 입력 1920 회의 입력을 확인한다. 박 beat 이 입력되지 않았을 경우 해당 박자부터 지휘를 다시 시작한다. 실험 후 자유 응답으로 error 에 대한 의견을 수집하였다.

박자 별 박 입력 성공률	1 480/480 100%	2 480/480 100%	3 464/480 96.9%	4 480/480 100%
총 박 입력 성 공률	1904/1920 99.2%			

[표 1] 총 박 입력 성공률

전체 박 beat 에 대해 99.2%의 성공률을 보이고 있다. 입력 error 가 발생하는 박 beat 은 3 번째 박 beat 으로 한정되어 있다. 실험 참가자의 지휘 동작에 따라 error 가 발생하지 않는 경우는 전문가의 지휘 동작 패턴과 유사하게 3 번째 박 beat 에서 지휘봉 끝에 Z 축 방향(중력 방향)으로 가속도가 발생할 수 있는 상하 운동을 충분히 하고 있었고, error 가 발생하는 경우는 상하 운동의 폭이 작고 좌우 방향으로만 지휘봉을 크게 움직임에 따라 Z 축 방향으로 충분한 가속도를 주지 못하여 센서의 threshold 2.5V 를 넘지 못하였다. 또한 빠른 박을 지휘할 때 동작이 분명하게 구분되지 못하여 error 가 발생하였으며, 느린 박을 지휘할 경우 사용자의 손과 지휘봉이 박 beat 의 명시가 이루어지지 않아야 하는 구간에서 진동함에 따라 동작 자체가 간결하지 못하게 되어 error 가 비교적 많이 발생하였다.

5. 결론 및 향후 과제

이상적인 Virtual Orchestra 모델의 완성을 위해서는 고려되고 사용되어야 할 기술의 종류가 다양하고 그 수준 또한 높은 정도를 요구하기 때문에 보다 많은 분야의 지식 및 인력과 시간이 필요할 것이다. 본 논문에서는 효과적인 Virtual Orchestra 의 재현을 위해서 무엇보다도 우선시 되어야 할 박 beat 를 명시하는 동작의 인식 정확도를 향상시키는 데에 집중하였다. 이에 따라 결과적으로 지휘 동작의 인식률은 향상되었으나, 이에 상응하는 청각적, 시각적 제공에 대한 부분에 대한 심도 있는 연구가 뒷받침되지 못하였다. 향후 본 논문에서 제시된 시스템을 개선시키기 위해 3 번째 박 beat 의 인식에서 주로 발생하는 error 의 정정, 여러 가지 음악 정보의 전달 지원, 고품질의 청각적, 시각적 feedback 제공 등이 이루어져야 한다.

참 고 문 헌

- [1] Richard Boulanger and Max Mathews, "The 1997 Mathews Radio-Baton & Improvisation Modes", Proceedings of the 1997 ICMC, Thessaloniki Greece
- [2] Hideyuki Morita, Shuji Hashimoto and Sadamu Ohteru, "Computer Music System that Follows a Human Conductor", IEEE Computer, 7/1991, pp.44-53
- [3] Eric Lee, Teresa Marrin Nakra, and Jan Borchers, "You're the Conductor: A Realistic Interactive Conducting System for Children", NIME 2004 International Conference on New Interfaces for Musical Expression, pp.68-73, Hamamatsu, Japan, June 2004
- [4] Sebastien Shertenleib, Mario Gutiérrez, Frédéric Vexo, and Daniel Thalmann, "Conducting a Virtual Orchestra", IEEE Multimedia, July-September 2004