3 차원 가속도 센서와 DSP 를 응용한 가상 악기 시스템 개발

이희승[1], 손동관[2], 노영해[3]
KAIST 전기및전자공학전공[1], KAIST 문화기술대학원[2],
KAIST 인문사회과학부[3]
{lee.h.s[1],itsdike[2],younghae[3]}@kaist.ac.kr

Development of a Virtual Instrument System Using 3-demensional Acceleration Sensors and Digital Signal Processor

Hui Sung Lee[1] , Dong Kwan Son[2] , Young Hae Noh[3]
Electrical Engineering, KAIST[1], Culture Technology, KAIST[2],
School of Humanities & Social Science, KAIST[3]

요 약

고전의 관현악기에서부터 현대의 각종 전자악기까지, 인류는 그 문화와 시대의 변화에 따라 다양한 형태의 악기를 개발하고 활용하였다. 최근에는 전기전자 기술의 발달로 다양한 센서와 프로그램을 활용해서 여러 가지 음색과 효과를 내는 악기가 개발되고 있다.

그 중에서 사람의 움직임을 직접 감지해서 음악적 도구로 활용하는 기술이 주목 받고 있다. 이를 위해 터치 센서(touch sensor), 비젼 센서(vision sensor), 자기장 센서(magnetic sensor), 초음파 센서(ultrasonic sensor) 등이 응용되고 있다. 그러나 지금까지의 센서 기술로는 사람의 움직임과 관련된 위치, 속도, 가속도 등에 대한 정보를 직접 추출하기가 어렵고, 구현된 시스템도 공간의 제약을 받거나 혹은 구현된 부피가 크거나 복잡한 구성형태를 지니고 있는 문제점이 있었다.

그래서 본 논문에서는 사람의 움직임과 관련된 가속도 정보를 직접 감지해서 새로운 형태의 악기로 활용될 수 있는 시스템을 연구하고 개발하였다. 이를 위해 6 개의 가속도 정보를 처리하는 기술과 DSP(Digital Signal Processor) 활용 기술, Max/MSP 활용 기술이 응용 되었으며, 소형의 시스템을 개발하기 위해 시그널 컨디셔닝(signal conditioning) 회로와 DSP 보드를 자체 개발하였다. 실험을 통해 사람의 움직임과 관련된 각종 정보가 적절한 소프트웨어의 활용으로 다양한 음색의 변화는 물론 음높이, 음량의 변화까지도 제어할 수 있음을 확인하였고, 새로운 형태의 악기로써 무대 공연이나 노래방 등에 폭넓게 활용될 수 있는 가능성을 확인하였다.

Keyword : 가상 악기(virtual instrument), 가속도 센서(acceleration sensor), Max/MSP, DSP

1. 서 론

예로부터 음악은 인류 문화의 중요한 요소를 차지하고 있으며, 음악을 소리로 표현하는 악기 역시 지역과 시대에 따라 다양한 형태로 개발되고 발전되어 왔다. 다양한 음색과 표현 기법에 대한 욕구는 현대의 각종 전자 악기를 통해 더욱 발현되었고, 다양한 센서를 활용한 전자 악기가 세상에 소개되어 사용되고 있다.

특히 사람의 움직임과 관련된 정보를 이용해서 음악적인 도구로 활용하기 위해 터치, 휨, 자기장, 비젼 센서 등이 많이 활용되고 있으나, 지금까지도 사람의 움직임의 기본 요소인 가속도, 속도, 위치 등을 효과적으로 사용하지 못하고 있다. 즉, 움직임을 직접적으로 감지할 수 있는 기술의 부족으로 소리와 사람의 움직임 사이의 밀접한 연관성이 떨어지는 문제가 있었다. 또한 다양한 음색과 효과를 내기 위해 다수의 센서나 센서 처리 장비가 필요하거나 사람의 움직임을 감지할 수

있는 공간의 제한도 따랐다[6][7].

따라서 본 논문에서는 소형이면서 공간의 제한이 없는 가속도 센서를 악기로써 활용할 수 있는 방법을 연구하였다. 이론적으로는 가속도를 적분해서 속도, 속도를 적분해서 거리를 측정할 수 있으나, 현재 상용화된 가속도 센서는 중력 가속도의 값이 물체의 절대 가속도와 함께 들어오고, 잡음/간섭 등의 영향으로 장시간의 위치 추정에 적용하기에는 어려운 부분이 많다. 물론 다른 센서의 도움이나 복잡한 신호 처리 기법을 이용해서 성능을 향상 시킬 수 있으나, 본 논문에서는 간편하게 이용할 수 있는 악기 개발에 초점을 맞췄기 때문에 복잡한 신호 처리 기법이나 다른 센서를 부가적으로 이용하는 기법을 제외하였다.

이에 본 논문에서는 가속도 센서의 출력 값인 가속도의 값만을 이용해서 다양한 효과를 낼 수 있는 가상의 악기 시스템을 구현하며 개발하는 과정과 그 실험 결과에 대해 기술한다. 가상의 악기 시스템을 구현하기 위해 필요한 센서 처리 기술, DSP 응용기술, Max/MSP 활용 등에 관해 간략하게 기술하고, 구현된 시스템을 활용한 실험 결과를 보이면서 새로운 형태의 악기로써의 가능성을 점검하도록 한다.

2. 전체 시스템의 구조

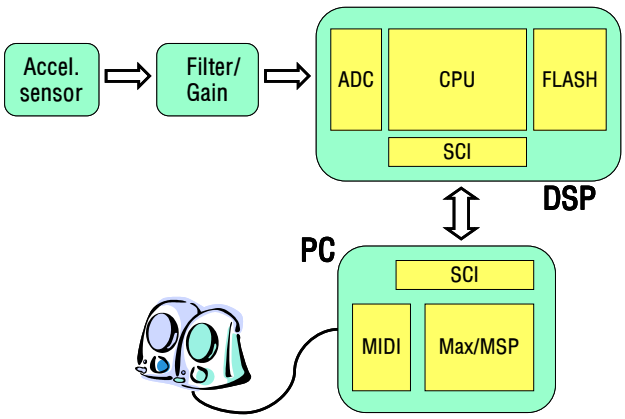

그림 1. 전체 시스템의 구조

구현된 가상 악기 시스템의 전체 구조를 그림 1에 나타내었다. 전체 시스템을 크게 하드웨어 부분과 소프트웨어 부분으로 나눌 수 있다. 하드웨어 부분에는 물체의 가속도를 전압 정보로 바꾸어주는 가속도 센서부, 가속도 정보를 필터링(filtering)하고 크기를 조정하는 시그널 컨디셔닝(signal conditioning)부, 가속도 값을 실제로 읽어서 신호를 처리하거나 이벤트 등을 생성해서 PC와 통신하는 DSP부로 나눠지고, 소프트웨어 부분에는 PC에서 동작되는 Max/MSP[4]부로 나눠진다. Max/MSP는 DSP로부터 전송된 데이터를 이용해서 다양한 악기 효과를 발생시키고 소리를 스피커를 통해 출력될 수 있도록 한다.

3. 하드웨어 구현

3.1. 가속도 센서[1]

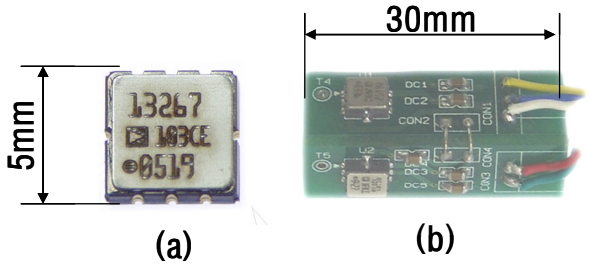

그림 2. (a)가속도 센서의 외형과 (b)제작된 가속도 센서 보드 사진. 2 축과 1 축 센서를 수직으로 부착하여 3 차원의 가속도 값이 생성되도록 구성하였다.

가속도 센서는 상용화된 제품 중에서 아날로그 디바이스사(Analog Devices, Inc.)의 ADXL103/203을 이용하였다. ADXL103은 1축을, ADXL203은 2축을 지원한다. ADXL103과 ADXL203을 서로 수직으로 부착하면, 3차원 공간상의 가속도 정보를 얻을 수 있다 (그림 2).

ADXL103/203 모두 ±1.7g[i] 까지 측정가능하고, 5V 전원이 인가된 상태에서, +1g에 대해 3.5V, -1g에 대해서는 1.5V, 0g에 대해서는 2.5V의 전압이 출력된다. 결국5V 전원이 인가된 상태에서는 0.3~4.7V의 출력이 발생한다. 가속도에 변화에 대한 전압의 변화가 약1V/g로 선형에 가까운 특성이 있으며 5mm×5mm×2mm 로 소형이므로, 사람이 잡고 손쉽게 움직일 수 있는 악기 개발에 응용될 수 있다.

현재 상용화된 가속도 센서는 물체의 절대 가

[i] g는 중력가속도

속도를 감지하는 것이 아니라, 절대 가속도에 중력 가속도가 더해진 성분을 감지해서 출력한다. 따라서 물체가 실제로 움직이는 절대 가속도를 추출하기 위해서는 별도의 신호 처리 과정을 거쳐야 물체의 3차원 공간상의 가속도를 얻을 수 있음에 주의해야 한다.

3.2. 시그널 컨디셔닝(signal conditioning) 회로[2]

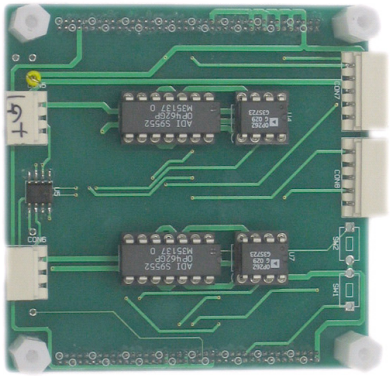

그림 3. 시그널 컨디셔닝 회로가 구현된 보드

가속도 센서의 출력은 잡음 성분도 포함되어 있으며, 약간의 미동에도 출력이 발생한다. 현재 3차원 공간에 6개의 센서가 부착된 상태이므로 3개는 미동에도 반응하게 하고, 나머지 3개는 큰 움직임에만 반응하도록 하여 동작의 강약을 구분할 필요가 있다. 또한 DSP의 ADC(Analog-to-Digital Converter) 입력은 0~3V의 범위의 입력을 변환할 수 있으므로, 가속도 센서의 출력을 ADC 입력 범위에 맞게 조정해야 한다. 즉, 동작의 강약 구분과 외부 잡음 성분을 제거하면서 ADC 모듈의 입력에 적합한 신호를 생성해주는 필터와 증폭도 조절 회로가 필요하다. 개발된 필터/증폭 회로의 구현된 결과를 그림 3에 나타내었다. 필터는 모두 1차 LPF(Low Pass Filter)로 구현되었으며, 저항과 캐패시터(capacitor)를 조정해서 대역폭과 증폭도를 조절할 수 있게 하였다.

3.3. DSP [3]

현재 구현된 시스템에서는 가속도 신호가 6 개로 출력된다. 그래서 6 채널 이상의 ADC 모듈

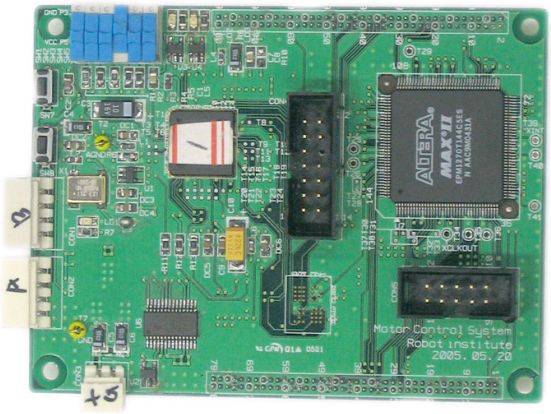

그림 4. 개발된 DSP 보드

(module)이 필요하고, 입력된 신호를 용도에 맞게 변경하거나 이벤트(event)를 발생시키는 등의 기능이 필요하다. 이러한 기능을 지원할 수 있는 DSP 로 TI(Texas Instruments)사의 TMS320F2812(이하 F2812)를 선택하였다. F2812 가 제공하는 다양한 모듈과 기본 기능 중에서 본 논문과 관련 있는 내용을 정리하면 다음과 같다.

- 최대 150MIPS
- On-chip memory: 128kWord Flash, 18kWord SARAM (1Word=16bits)
- 외부 인터럽트 지원: 3개
- 3개의 CPU 타이머와 4개의 범용 타이머 지원
- 16채널의 ADC 모듈: 2개의 Sample-and-Hold와 시퀀서(sequencer) 지원, 80ns conversion time
- 최대 56개의 GPIO (General Purpose Input/Output)
- 다양한 통신 환경: SCI (Serial Communication Interface) 2개, McBSP, SPI, eCAN 지원

F2812에서 제공되는 모듈 중에서 본 논문에서는 ADC와 SCI를 중점적으로 이용한다. F2812의 ADC의 주요 성능만을 다시 요약하면 다음과 같다.

- 12bits ADC core: 입력 신호를 0~4095 로 변환
- 입력신호 허용 범위: 0~3V
- 16 개 입력 채널
- 2 개의 시퀀서를 이용한 다양한 샘플링 순서 설정 가능

본 논문에서는 가속도 센서로부터 6개의 신호

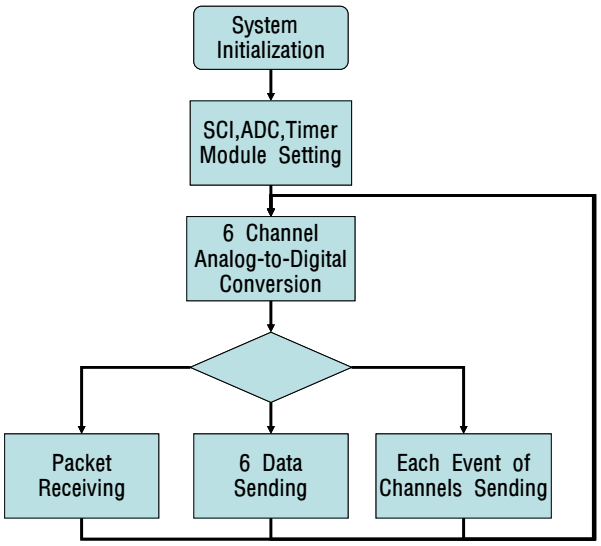

그림 5. DSP 에 구현된 프로그램의 전체 구조

가 전달되므로 6채널만 사용해도 되나, ADC 모듈에서 제공되는 2개의 시퀀서를 이용해서 같은 신호를 서로 다른 두 채널에 동시에 받아서 처리하도록 설정하였다. 그래서 실제로는 12개 채널을 사용하도록 설정하였다. 이러한 환경에서 현재 시스템은 가속도 센서의 각 신호를 약 200Hz의 샘플링 주파수로 샘플링하고 있다.

이렇게 샘플링된 신호는 DSP 내부의 램에 임시 저장되면서 사용자 요구에 맞게 신호 처리가 될 수 있다. 본 논문에서는 6개의 센서 신호 값을 그대로 바이너리(binary)로 변환해서 PC로 전송하면서, 특정 문턱값(threshold)을 넘었을 때 이벤트를 발생해서 전송하는 기능을 구현하였다. DSP에 구현된 프로그램의 전체 구조를 그림 5에 나타내었다. 사용자로부터 동작 시작 명령이 전송되면 주기적으로 A/D 변환을 수행하면서, 원하는 이벤트 발생시 이벤트 처리와 사용자 명령 처리 등을 수행하도록 하였다.

F2812에서 PC로 데이터를 전송할 때는 SCI 기능을 활용한다. F2812가 지원하는 SCI의 주요 성능은 다음과 같다.

- RS-232c 지원
- 2 개의 SCI 포트 지원
- Full duplex, 최대 9Mbps 지원
- Interrupt driven enable
- 16 개의 송수신 FIFO(First Input First Output)

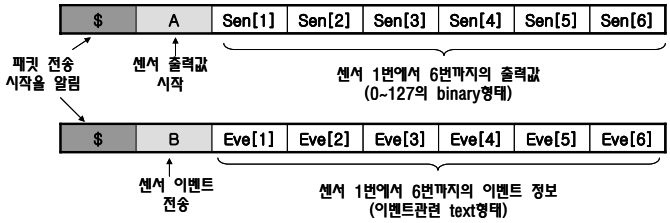

그림 6. DSP 에서 PC 로 전송되는 패킷의 형태와 의미

본 연구에서는 미리 정해진 형태의 패킷(packet) 전송이 주로 발생하므로, SCI의 송수신 FIFO를 최대한 활용하였다. PC와는 현재 115200bps로 데이터를 송수신한다. 현재 사용되는 패킷의 형태와 의미는 그림 6과 같다. 그 외의 기능에 대한 추가도 사용자의 패킷 정의로 손쉽게 설정해서 이용할 수 있다.

4. 소프트웨어 구현

소리를 생성하기 위해서는 DSP로부터 전송되는 가속도 값과 각종 이벤트를 이용하는데 이러한 기능은 PC내에서 다양한 프로그램으로 구현될 수 있다. 즉 사용자가 원하는 대로 주어진 신호와 이벤트를 적절히 응용하면 다양한 음색을 생성할 수 있는데, 본 연구에서는 멀티미디어 콘텐츠 제작에 많이 활용되는 Max/MSP [4]를 이용하였다.

Max/MSP는 간단한 과정으로도 PC의 멀티미디어 기능을 손쉽게 제어할 수 있고 독립 실행 가능한 기능도 포함하고 있어서, 가상 악기 개발과정에서 다양한 음악적 실험을 손쉽게 구현할 수 있는 장점이 있다.

Max/MSP로부터 시작 신호를 발생시키고, 이 신호는 PC와 DSP간의 직렬 통신을 통해 DSP 보드에 전송된다. 시작 신호를 받은 DSP 보드는 가속도 센서의 값을 A/D 변환을 해서 주어진 주기에 맞춰 Max/MSP로 전송한다. 물론 각종 이벤트 정보를 비주기적으로 전송하기도 한다. 전송된 각종 데이터와 이벤트를 어떻게 사용할 것인지는 프로그래머나 악기 연주가의 의도에 달려있고, 어떻게 코딩을 하느냐에 따라 다양한 음색과 효과를 구현할 수 있다.

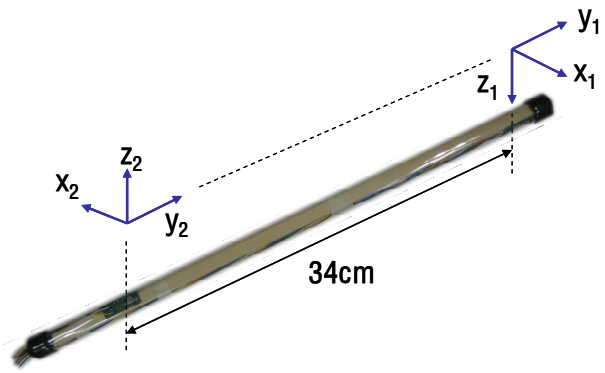

그림 7. 6개 가속도 센서가 장착된 모습. 각 축의 +방향으로 진행할 때 센서 출력값이 증가하고, -방향으로 진행할 때는 센서 출력값이 감소한다.

5. 실험 및 결과

가속도 센서 3개씩 3차원 공간을 형성할 수 있도록 조립하고, 3개의 묶음을 가속도 센서 모듈이라고 정의하겠다. 가속도 센서 모듈은 현재 약 34cm 간격으로 서로 떨어져 수평선 상에 부착되어 있고, 손으로 실험용 도구를 집었을 때 가까운 쪽의 모듈을 모듈2로, 먼 쪽을 모듈1로 정의하였다. 각 센서 모듈이 형성하는 3차원 공간과 실험용 도구를 그림 7에 나타내었다. 그림 7의 도구에서는 모듈1과 모듈2는 서로 y축이 평행하고, 모듈2는 모듈 1의 y축을 중심으로 180도 회전한 자세로 부착되어 있다.

현재 시스템에서는 모듈1에 대해서는 약 20Hz의 대역폭(bandwidth)을, 모듈2에 대해서는 약 5Hz의 대역폭을 갖도록 LPF를 설계 하였다. 이는 200Hz의 샘플링 주파수에서 anti-aliasing 효과를 보면서 의미 있는 움직임 정보를 추출하기 위해서이다[5]. DSP내의 ADC 모듈에서는 팔의 움직임에 비해 빠른 200Hz의 고속 변환이 이루어지고 있으나, 신호의 정보가 파괴되지 않는 범위에서 패킷 양을 줄이면서 많은 정보를 전송하는 것도 필요하다. 그래서 6개의 가속도 센서의 출력값을 PC로 전송하는 주기는 현재 40Hz(25ms)로 설정하였다. 이는 현재 시스템의 실험 과정에서 사람의 의미 있는 팔의 움직임이 10Hz 이내로 이뤄지고 있다고 가정하였고, 10Hz의 2배 이상인 40 Hz의 샘플링 주기로도 의미 있는 팔의

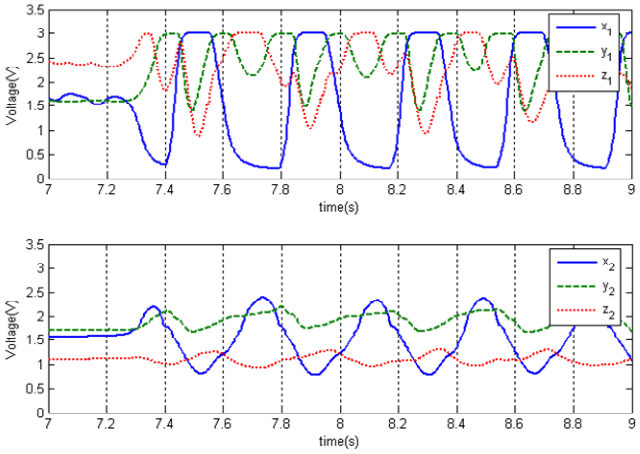

그림 8. 약 0.28 초(약 4Hz) 주기의 진동에 따른 6개 가속도의 변화. Z 축 중심의 0~60 도 x-y 평면 회전 운동

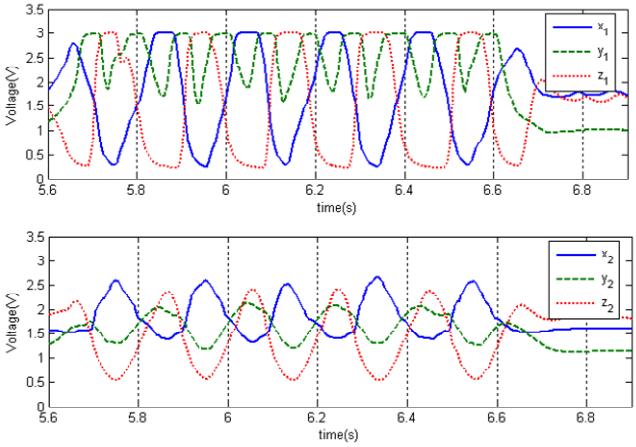

그림 9. 약 0.15 초(약 7Hz) 주기의 진동에 따른 6개 가속도의 변화. X 축 중심의 0~90 도 y-z 평면 회전 운동

움직임을 추출할 수 있기 때문이다[5].

실험용 도구를 잡고 z축과 평행한 축을 중심으로0~60도 범위로 5회 왕복 회전 시켰을 때의 x_1, y_1, z_1 센서의 출력값과 x_2, y_2, z_2 센서의 출력값을 각각 A/D변환한 결과를 그림 8에 나타내었다. 또한 0~90도 범위로 수직으로 5회 회전 시켰을 때의 각각의 센서값의 A/D 변환한 결과를 그림 9에 나타내었다. 그림 8과 그림 9에서 모듈1의 출력이 모듈2의 출력보다 더 크게 변화하고 팔의 움직임에 더 민감하게 반응함을 알 수 있다. 이는 도구의 회전 중심이 모듈2에 가까운 영향도 있지만, 모듈1의 대역폭이 모듈2보다 크기 때문에 작은 움직임에도 반응하기 때문이다.

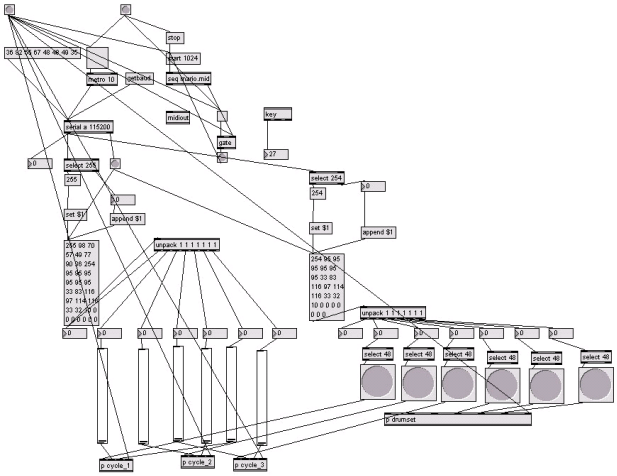

그림 10. Max/MSP 상에서 작성된 코드의 예

앞의 실험 결과를 통해 사람의 팔 움직임의 방향과 강약에 따라 각 센서의 출력값의 형태가 차이가 있음을 알 수 있고, 이러한 정보를 이용해서 다양한 음색 조절, 음량 조절, 음높이 조절이 가능함을 알 수 있다.

다양한 소리의 조작을 위해 PC상에서 여러 가지 도구가 활용될 수 있으나, 앞서 소개한 Max/MSP를 이용해서 다양한 음색과 음량, 음높이 조절을 시도해 보았고, 작성된 코드의 한 예를 그림 10에 나타내었다.

Max/MSP로 전송된 센서 신호는 MIDI scale(0~127)로 입력되어 MIDI 소리를 재생할 때 음높이 정보나 음량 정보로, 혹은 악기 음색 정보로 활용될 수 있다. MIDI note의 발생은 가속도 변화에 상응하여 계속적으로 생성될 수도 있고, 이벤트 신호를 받아서 비주기적으로 생성될 수도 있다. 또한 정현파(sine wave) 발생 함수에 연결하여 현대 음악에서 쓰일 수 있는 전혀 새로운 전자음을 즉흥적으로 발생시킬 수도 있음을 확인하였다.

6. 결 론

최근에 상용화 되면서 다양한 분야에서 응용되는 가속도 센서가 음악적 도구로도 활용될 수 있는 가능성을 확인하기 위해 가상의 악기 시스템을 구현해 보았다. 이러한 시스템을 구현하기 위해 시그널 컨디셔닝 회로, A/D 변환, DSP, 직렬통신, Max/MSP와 같은 도구나 기법이 적용되었다. 가속도는 3차원 공간상의 물체의 움직임에 대한 정보를 제공하므로, 사람의 움직임이 음색, 음량, 음높이 등에 직접 영향을 줄 수 있음을 실험 결과로 확인하였다.

연주자의 움직임이 그대로 악기 음색과 음량, 음높이 등에 영향을 주므로, 본 연구와 같은 가상 악기 시스템은 현대 예술의 음악적 도구로 혹은 연주 무대나 노래방 등에서 다양한 음색 발생기로 충분히 활용될 수 있을 것이다.

추후 과제로는 신호 처리 방식을 개선해서 짧은 시간(최소 5초 이상)이라도 특정 원점으로부터 3차원 상의 상대 위치 정보를 추출할 수 있는 기술 구현이 필요하고, 가속도 센서나 신호 처리 시스템 사이의 무선화로 시스템의 간편화를 추구할 필요가 있다.

참 고 문 헌

[1] Analog Devices, http://www.analog.com

[2] A. S. Sedra and K. C. Smith, *Microelectronic Circuits*, Oxford University Press, New York, 1998

[3] Texas Instruments, http://focus.ti.com/docs/prod/folders/print/tms320f2812.html

[4] Cycling 74, http://cycling74.com/products/maxmsp

[5] A. V. Oppenheim and R. W. Schafer, *Discrete-Time Signal Processing*, Prentice Hall, New Jersey, 1998

[6] Joel Chadabe. *Electric Sound: The Past and Promise of Electronic Music,* Prentice Hall, New Jersey, 1997

[7] Hugh Davies, “Early Electronic Music,” *The New Grove Dictionary of Musical Instruments,* Grove’s Dictionaries, New York, 1984