

가속도센서를 이용한 터치패널시스템 구현

Implementation of a Touch Panel System using Accelerometers

이영섭*, 김동일, 강민수
(Young-Sup Lee¹, Dong-II Kim¹, and Minsu Kang¹)

¹University of Incheon

Abstract: A touch panel system has been one of the most widely used input devices. In this study, a touch panel embedded system using accelerometers is considered in order to make commercial white-boards or plates into touch panels. Three accelerometers are located at different positions on such a white board, so that touch points on the board can be identified using the sensors. For the identification of touch points, a TDOA (Time Difference of Arrivals) technique is applied in the algorithm which was implemented in a DSP board (TI 6713 DSK), which can provide a precise touch location by using the cross-correlation function of measured signals from the three accelerometers. Experiment results show that the touch panel system with accelerometers could provide the exact touch location. Thus a novel approach using such accelerometers could be applied to a new touch panel system.

Keywords: touch panel, accelerometer, cross correlation function, touch location, TDOA (Time Difference of Arrivals)

1. 서론

터치패널은 키보드나 마우스와 같은 입력장치를 이용하지 않고 화면에 나타난 문자나 특정위치에 사람의 손 또는 물체가 패널에 접촉하면, 접촉된 위치를 파악하고 이에 대응하는 터치위치정보를 제공한다. 터치패널은 최초 군사용으로 개발되었으며, 우수한 휴대성, 간편한 작동방식과 직관적으로 쉽게 사용할 수 있는 장점으로 인하여 민간의 모바일 분야, 서비스분야, 산업분야, 의료분야와 가전분야 등에서 휴대폰, 자동차 내비게이션, 게임기, 태블릿(tablet) PC, 자동현금지급기, 산업기기, 의료기기와 전자책판 등의 다양한 용도로 확대되어 사용되고 있으며, 그 요구가 더욱 증가하고 있다[1,2].

현재 실용화되고 있는 터치패널기술에는 정전용량(capacitive) 방식, 저항막(resistive) 방식, SAW (Surface Acoustic Wave; 초음파) 방식, 적외선(infrared) 방식으로 구분되며[1] 광 도파로(optical waveguide)를 이용하는 방식[3] 등이 있다.

정전용량(capacitive) 방식은 터치패널에 터치가 인식되면 적은 양의 전하가 터치위치로 이끌리게 되고 패널의 네 귀퉁이에 위치한 회로들이 전하를 측정한다. 이 정보로 터치위치를 인지하는 방식이다. 내구성이 강하고 반응 시간이 짧고 투과성이 좋으며 외부요소에 의해 영향을 받지 않는 장점과 반드시 손가락으로 접촉해야 하는 단점을 가진다[1,3]. 저항막 방식은 투명전극이 코팅되어 있는 두 장의 기판을 합착시킨 구조로 손가락이나 펜으로 압력을 가해 상부와 하부의 전극 층이 접촉되면 전기적 신호가 발생되어 위치를 인지하는 방식이고 가격이 싸고 정확도가 높다[1,3]. SAW 방식은 방출된 초음파가 장애물을 만나 파동의 크기가 줄어든 것을 감지하는 특성을 이용한 방식이며 유리재질로 구성되어 손은 물

론 장갑을 끼고 사용이 가능하고, 우수한 투명도와 뛰어난 선명도와 해상도를 가진다[3].

그리고 적외선 방식은 사람의 눈에 보이지 않으나 직진성을 가지고 있어 장애물에 의해 차단되는 특성을 이용한 방식이며 정전용량 방식, 저항막 방식, 초음파 방식 등에 비해 적은 비용으로 대형스크린에 적용시킬 수 있으며 화면의 투과성 및 내구성이 강하다는 장점과 화면의 크기가 커질수록 필요한 발광소자와 수광 소자의 개수가 비례적으로 증가하여 비용이 커진다는 단점이 있다[4]. 광 도파로를 이용한 예로 1984년 Kasday에 의해 제안된 방법은 음극선관(CRT: Cathode-Ray Tube) 래스터 위치와 광속이 검출된 시각과의 관계로부터 화면의 접촉 부분 위치를 검출하는 방식이다[3]. 상기 방법과 달리 벨기에의 IMEC 사에 의해 제안된 방법은 두 층으로 분리되어 서로 수직하게 배치된 도파로 배열을 이용하는 방법이다. 전자는 CRT를 기반으로 한 디스플레이 장치에만 적용할 수 있는 한계가 있고, 후자의 경우 광속의 전이 효율이 매우 낮은 문제점이 있다[5].

본 연구에서 다루는 다중의 가속도센서를 이용하여 판에서의 터치위치 추정하는 것은 터치패널시스템에 대한 새로운 접근법으로서 도착시간차(TDOA: Time Difference of Arrivals)로 알려진 기법을 이용한다. TDOA 기법은 레이더(radar), 소나(sonar) 등에서 물체의 위치를 탐지하기 위해 많이 사용되고 있는 기법이며, 이 경우 도착시간차의 정확한 추정을 위한 상호상관함수의 계산이 중요하며 많은 연구가 이루어져 왔다[6-8].

상기에 기술한 것과 같이 터치패널시스템 방식은 각각 고유의 특징과 장단점으로 사용용도에 맞게 여러 분야에서 사용되고 있다. 향후 터치패널은 꾸준한 성장세를 이어나갈 것이며, 이에 발 맞추어 사용범위의 확대에 각 사용용도에 따라 다양한 터치패널방식이 끊임없이 요구될 것이다. 기존의 터치패널들은 시스템을 구성하기 위하여 다소 복잡한 내부 구조와 터치를 감지하기 위한 패널표면에 별도의 장치가 필

* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수: 2011. 8. 18., 수정: 2011. 11. 10., 채택확정: 2011. 11. 15.

이영섭, 김동일, 강민수: 인천대학교 임베디드시스템공학과

(ysl@incheon.ac.kr/kdisyj@naver.com/karten99@gmail.com)

※ 본 연구는 인천대학교 2009년도 자체연구비에 의하여 연구되었음.

요한 단점을 가지고 있다.

이를 고려하여 상용의 화이트보드와 가속도센서를 사용하여 정확히 위치를 찾아내는 터치패널시스템을 제안한다. 본 논문에서 제안하는 터치패널시스템은 3개의 가속도센서 및 고속의 신호처리 전용보드를 사용하므로 기존의 터치패널에 비해 매우 단순한 구조를 가진다. 아울러 가속도 센서가 탐지 가능한 진동이 유발되는 평판들은 이 방법으로 간단하게 터치패널로 변환시킬 수 있는 큰 장점이 있다.

본 논문의 II 장에서는 제안된 터치패널시스템의 탐지원리와 향상기법에 대하여 기술하였으며, III 장에서는 실제 시스템의 구성과 구현을 기술하였고, IV 장은 실험결과 및 분석을 기술하였다.

II. 가속도센서를 이용한 터치패널 시스템 개념

1. 터치위치 탐지 원리

균일한 두께와 균일한 재료로 구성되는 일반적인 사각판 위에 다중의 센서를 부착하여 이를 터치패널로 사용 가능한 시스템을 구성하고자 한다. 구성원리는 터치가 발생하면 사각판은 미소한 진동을 하게 되고, 그 진동의 파동이 퍼져나가 터치위치에서 가까운 순서대로 센서들이 그 파동을 측정하게 된다. 그러면, 각 센서에 진동파동의 전파시간이 미세한 차이가 존재하게 되므로 이를 바탕으로 터치위치를 추정하게 되므로 이를 바탕으로 터치위치를 추정할 수 있게 된다. 아래에 이에 대한 세부적인 기술을 하였다. 그림 1과 같이 사각판 위에 3개의 가속도센서 (s_1, s_2, s_3) 를 $+x$ 축 위에 등간격 d 로 부착하고 $+x$ 축 및 $+y$ 축에 의해 생성되는 제한된 면적의 터치영역(touchable area)을 고려한다. 이 가속도센서 3개로 터치영역 상의 터치위치를 탐지하게 된다.

터치영역상의 한 위치 (x, y) 를 터치하면 각 센서로 그림 1과 같이 원형의 진동파동이 속도 c 로 퍼져나간다. 이때 터치위치에서 가까운 센서의 순서대로 그 파동을 측정할 수 있게 되며, 3개의 센서 측정신호는 파동의 도착시간차를 가지게 된다. 그리고 터치위치에서 각각의 센서까지의 거리는 r_1, r_2, r_3 로서, 진동파동 전파속도 c 와 터치위치에서 각각의 센서까지 파동의 전파시간 t_1, t_2, t_3 의 곱으로 각각 표현된다.

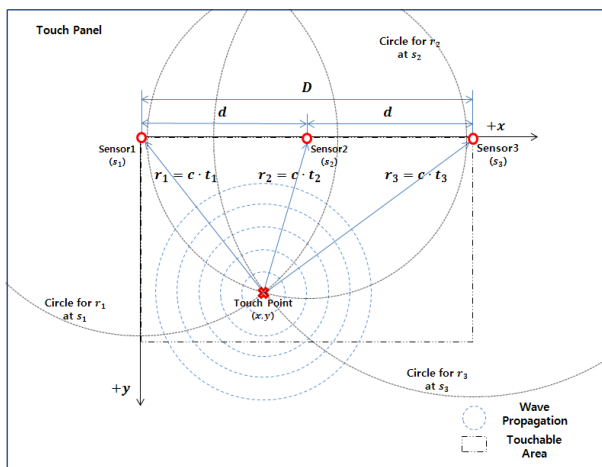


그림 1. 터치패널시스템 구성도.

Fig. 1. Touch panel system configuration.

터치가 발생한 순간의 절대적인 시간을 알 수 없으므로 t_1, t_2, t_3 를 사용하는 대신, 측정 가능한 각 센서에 도착하는 파동의 시간지연 ($\Delta t_{12} = t_1 - t_2, \Delta t_{13} = t_1 - t_3, \Delta t_{23} = t_2 - t_3$) 을 이용하여 터치위치의 추정을 수행한다.

2. TDOA방법을 통한 터치위치의 추정

TDOA는 신호의 발생위치를 파악하기 위해서 흔히 사용되는 방법이다. 이 방식의 원리를 이용하여 평판에서 터치로 인해 다중의 센서들에 전파되어 오는 신호들의 도착시간차를 측정하고 터치신호의 발생위치를 추정하는 방법을 기술한다.

터치위치 (x, y) 은 그림 1과 같이 각 센서들의 위치를 중점으로 반경이 각각 r_1, r_2, r_3 인 3개의 원을 그리면 세 원이 동시에 만나는 $x > 0, y > 0$ 인 1개의 위치좌표를 얻게 되는데 이 좌표가 터치위치이다.

이 터치의 위치좌표는 그림 1과 같이 $x-y$ 평면에서 센서 1의 위치를 원점 $(0, 0)$ 으로 하는 3개의 원의 방정식으로부터 구할 수 있다.

$$x^2 + y^2 = r_1^2 \quad (1)$$

$$(x-d)^2 + y^2 = r_2^2 \quad (2)$$

$$(x-D)^2 + y^2 = r_3^2 \quad (3)$$

여기서 D 는 센서 1과 센서 3의 직선거리이며 d 의 2 배이다. 그리고 r_1, r_2, r_3 는 아래와 같은 관계를 가진다.

$$\begin{aligned} r_2 &= r_1 - (c \cdot \Delta t_{12}), \\ r_3 &= r_1 - (c \cdot \Delta t_{13}), \end{aligned} \quad (4)$$

$$r_3 = r_2 - (c \cdot \Delta t_{23})$$

이 관계식들을 이용하면 터치위치를 추정할 수 있게 된다. 여기서는 y 값이 고정된 경우와 가변인 경우에 대해 각각 터치위치 (x, y) 는 아래와 같이 추정할 수 있다.

터치가 가능영역의 어떤 위치 (x, y) 에 터치가 된 경우를 가정하면, y 값은 가변적이므로 식 (1), (2), (3)을 모두 연립하여 실험적으로 측정 가능한 Δt_{12} 및 Δt_{13} 을 기준으로 연산하면 아래와 같이 r_1 을 구할 수 있다(물론 Δt_{12} 와 Δt_{23} 그리고 Δt_{13} 와 Δt_{23} 를 기준으로 r_1 을 구할 수도 있다).

$$r_1 = \frac{c^2 d (2\Delta t_{12}^2 - \Delta t_{13}^2) + 2d^3}{2cd(2\Delta t_{12} - \Delta t_{13})} \quad (5)$$

얻어낸 r_1 을 식(1)과 식(2)에 대입하여 식(6)을 얻는다. 이때 $x > 0, y > 0$ 인 값이 터치영역내의 값이므로 터치위치 (x, y) 를 구할 수 있다.

$$(x, y) = \left(\frac{(c^2 \Delta t_{12} \Delta t_{13} (\Delta t_{12} - \Delta t_{13}) - d^2 (2\Delta t_{12} + \Delta t_{13}))}{2d(2\Delta t_{12} - \Delta t_{13})}, \sqrt{r_1^2 - x^2} \right), \quad (6)$$

$$x > 0, y > 0, r_1^2 > x^2$$

만약 $y = y_0$ 의 경우처럼 y 값이 고정되어 있는 경우에는 아래의 식을 이용하여 터치위치 (x, y_0) 를 구할 수 있다.

$$(x, y_0) = \left(\frac{-\beta + \sqrt{\beta^2 - 4\alpha\gamma}}{2\alpha} \text{ or } \frac{-\beta - \sqrt{\beta^2 - 4\alpha\gamma}}{2\alpha}, y_0 \right), \quad (7)$$

$$x > 0, y_0 > 0, \beta^2 > 4\alpha\gamma$$

여기서 미지수 α, β, γ 는 Δt_{12} 를 이용할 경우 다음과 같이 주어진다.

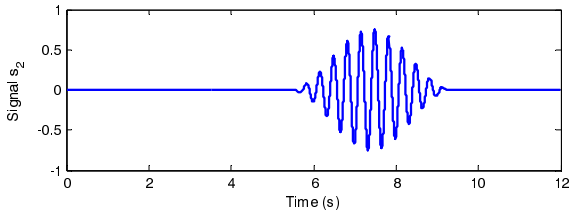
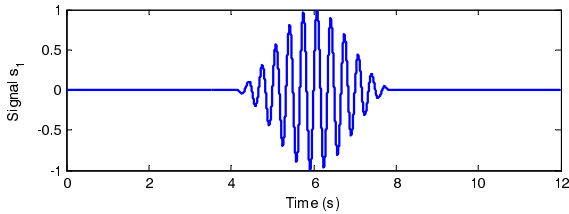
$$\begin{aligned} \alpha &= 4((c\Delta t_{12})^2 - d^2), \quad \beta = -4d((c\Delta t_{12})^2 - d^2), \\ \gamma &= 4(c\Delta t_{12})^2 y_0^2 + 2((c\Delta t_{12})^2 d^2) - (c\Delta t_{12})^4 - d^4 \end{aligned} \quad (8)$$

3. 도착시간차 추정기법

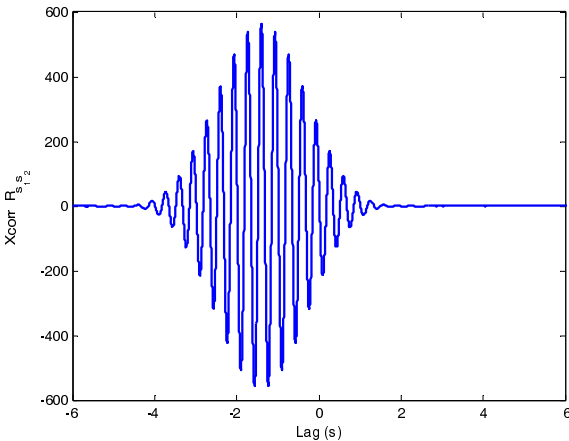
터치로 인해 판에 발생하는 진동파가 터치위치로부터 서로 다른 거리로 떨어진 (하나는 터치위치에 가까이 다른 하나는 멀리) 두 개의 가속도센서에 계측된 신호 $s_i(t)$ 와 $s_j(t)$ 가 다음과 같이 주어 질 때,

$$\begin{aligned} s_i(t) &= s_o(t) + n_i(t) \\ s_j(t) &= \alpha s_o(t) + n_j(t) \end{aligned} \quad (9)$$

이때 $s_o(t)$ 는 한 번의 터치로 인한 판의 순수한 진동신호로서 그림 2(a)와 같이 평균이 0 (zero-mean)이고, 시간에 따라



(a) Two typical touch signals with time delay = 1.4 seconds.



(b) Cross-correlation function.

그림 2. 상호상관 함수의 도착시간차 추정.

Fig. 2. Time arrival difference estimation with the cross-correlation function.

점차로 파동의 진폭이 증가했다 감소하는 일종의 정현파 신호로 가정한다.

여기에서는 실제로는 터치에 의해 판의 다양한 진동파형이 발생하나 가장 큰 에너지를 운반하는 면의 방향의 굽힘 파형만을 고려한다[9]. 그리고 α 는 상대적인 진폭인자 (amplitude factor)이며, $n_i(t)$ 및 $n_j(t)$ 는 각각의 가속도계에서 계측된 노이즈이다. 가장 이상적인 경우는 노이즈가 없는 순수 굽힘 진동파형의 $s_o(t)$, 그리고 $s_j(t)$ 가 $s_i(t)$ 와 비교하여 시간 Δt_{ij} 만큼 지연된 신호일 때이다.

그런데 이러한 터치로 인한 진동신호는 단순히 그 파형을 시간 영역에 두고 비교해서는 그 시간지연 Δt_{ij} 를 알기가 어려운 경우가 많다. 이런 경우엔 두 신호의 상호상관함수 (cross-correlation function) $R_{s_i s_j}(\tau)$ 를 사용하여 추정 가능한 데 [10] 즉,

$$\begin{aligned} R_{s_i s_j}(\tau) &= E[s_i(t)s_j(t+\tau)] \\ &= \alpha R_{s_i s_i}(\tau - \Delta t) + R_{n_i n_j}(\tau) \end{aligned} \quad (10)$$

여기서 $E[\]$ 는 두 신호 $s_i(t)$ 와 $s_j(t)$ 의 곱의 앙상블 평균 (ensemble average) 이다.

그래서 두 센서신호가 서로 연관되어 있고(correlated), 시간 지연이 있을 때는 그림 2(b)와 같이 상호상관함수 $R_{s_i s_j}(\tau)$ 는 대칭성을 가지고 피크치가 $\tau = \Delta t_{ij}$ 에서 나타나게 된다. 이와 같은 형상이 전형적인 상관함수의 그래프이다. 그리고 두 신호간에 시간지연이 없으면 피크치가 $\tau = 0$ 을 기준으로 대칭성을 가지고 나타난다.

이와 같은 시간지연의 정도를 나타내 주는 상호상관함수의 특성을 이용하면, 터치위치로부터 떨어진 두 지점에서 각각 계측된 신호로부터 도착시간지연을 추정해 낼 수 있다. 왜냐면, 그 두 신호는 터치로 인해 발생하는 신호를 감지하므로 서로 연관성을 가지고 있기 (correlated) 때문이다.

그래서 노이즈 $n_i(t)$ 와 $n_j(t)$ 가 서로 연관되어 있지 않다면, 식(10)의 $R_{s_i s_j}(\tau)$ 는 간단히 다음과 같이 된다.

$$R_{s_i s_j}(\tau) = \alpha R_{s_i s_i}(\tau - \Delta t_{ij}) \quad (11)$$

즉, 그림 2(b)와 같이 상호상관함수는 시간차 Δt_{ij} 를 가진 $s_i(t)$ 신호의 자기상관함수 (auto-correlation function)로 나타나게 된다. 그래서 그림 2는 $s_{i=1}(t)$ 는 $s_{j=2}(t)$ 보다 1.4초 먼저 터치로 인한 진동신호가 도착한 경우로서 그림 2(b)의 상호상관함수는 그 피크치가 $\tau = \Delta t_{12} = -1.4$ 초의 위치에 그려졌다.

그리고 시간지연 Δt_{ij} 부호의 (+)(-)에 따라 상호상관함수의 피크치 위치가 달라진다. 즉, 터치위치와 센서간의 거리가 $r_i > r_j$ 이면, 상호상관함수의 피크치는 시간 축의 (+)쪽에 나타나고, $r_i < r_j$ 이면 (-)쪽에 나타난다. 그래서 이상의 방법으로 터치로 인한 신호를 두 개의 센서로부터 받아서 상호상관함수를 계산해서 보면 시간지연 Δt_{ij} 를 알 수 있게 되는데,

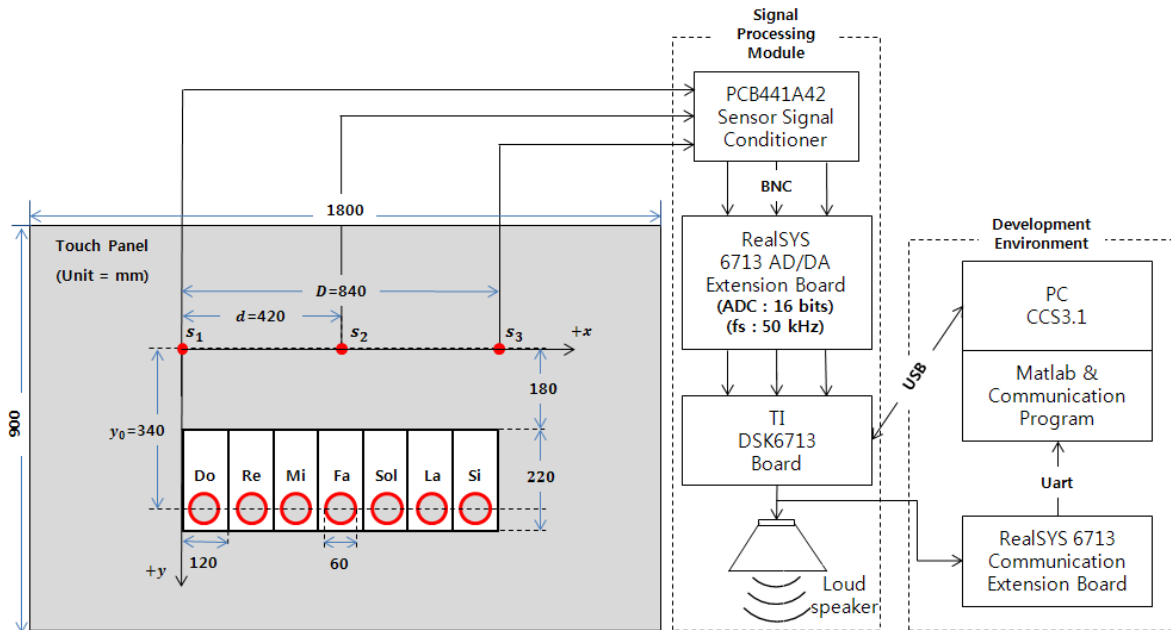


그림 3. 3개의 가속도센서를 이용한 터치패널시스템의 구현개념.
 Fig. 3. Concept of implementation a touch panel system using three accelerometers.

터치로 인한 진동파의 속도를 정확히 알고 있으면 터치위치의 계산은 가능하게 된다. 결국 실제에 있어서는 제한된 시간 동안 센서의 신호를 계측한 후 상호상관함수를 계산해서 터치위치를 찾아내는 것이 도착시간차 추정법의 기본이 된다.

4. 터치패널시스템구성

본 터치패널시스템은 그림 3과 같이 크게 두 가지 부분으로 구성되어 있다. 첫째는 터치패널로서 사각형 판과 일정한 격 d 로 배치된 가속도계로 이루어져 있다.

둘째는 신호처리 모듈(signal processing module)로서 가속도 센서로부터 오는 신호를 증폭 및 처리하는 역할을 한다. 개발환경은 TI의 DSK6713 DSP 보드와 TI의 CCS (Code Composer Studio) 3.1이며, RealSYS의 6713 AD/DA보드와 6713 통신보드가 같이 사용되었다. 또한 3개의 PCB Piezotronics 352C66(Sensitivity 100mV/g) 가속도센서를 사용 하였으며, 그림 3의 s_1, s_2, s_3 지점에 각각 위치 한다. 이와 같이 구성되는 터치패널 시스템을 실증하기 위하여 ‘Do’, ... , ‘Si’ 까지 7개의 음계를 가진 화이트보드 위에 구현하였다.

첫째, 터치패널은 그림 3에서 보는 것과 같이 7개의 건반을 $1800 \times 900 \text{ mm}^2$ 크기의 화이트보드상에 그렸는데, 각 건반의 크기는 $220 \times 120 \text{ mm}^2$ 이고, 각 건반의 가운데에 터치가능원(touchable circles)을 직경 60 mm로 표시하였다. 각 건반을 터치 할 때는 이 터치가능원의 내부를 터치하는 것으로 규정 하였다.

둘째, 신호처리모듈은 3개의 가속도센서로부터 오는 진동 파동신호를 PCB Piezotronics 441A42 신호조정기를 통해 증폭 시키고, 16 bits ADC와 $f_s = 50 \text{ kHz}$ 의 샘플링 주파수로 신호 데이터를 디지털화시켜서 TI DSK6713 보드로 전달한다. 그 후 TI DSK6713 보드에서 각 가속도센서로부터 전해온 진동 파동신호 s_1, s_2, s_3 로부터 상호상관함수 $R_{s_1s_2}, R_{s_1s_3}, R_{s_2s_3}$ 를

구한다. 이를 미리 정의된 오차범위를 포함한 도착시간지연 값과 비교하고 터치위치 (x, y) 를 추정하여 해당 음계의 사운드를 출력하게 된다.

III. 가속도센서를 이용한 터치패널시스템 구현

1. 진동신호의 전파속도 측정

본 시스템에서 터치패널에 터치가능영역을 터치하면 그림 1과 같이 터치로 인한 진동신호가 전파되어가는데, 정확한 터치위치 (x, y) 를 정밀하게 추정하려면 2.2절에서 기술된 바와 같이 이때의 속도 c 를 정확히 알아야만 한다. 그래서, 그림 4와 같이 터치패널 위에 터치위치를 3개의 가속도센서를 동일한 축 상에 배치하고, 터치 시 발생한 진동의 센서간 도착시간차를 이용하여 진동신호의 전파속도를 추정한다.

가속도센서는 PCB 352C66 모델 3개를 사용하였으며, 센서의 신호는 PCB 441A42 신호조정기를 통해 증폭되어 $f_s = 50 \text{ kHz}$ 의 샘플링 주파수로 계측장치 NI 9233과 NI USB 9162로 전달되었으며, 이후 PC에서 NI Signal Express로 분석하였다. 모두 6번의 터치를 통해 진동파동의 평균전파속도를 추정하였다. 그림 5(a)는 이때 측정된 시간영역의 파형을, 그림 5(b)는 그때의 센서 s_i 및 s_j 신호간에 상호상관함수 $R_{s_i s_j}$ 의 계산결과를 각각 나타낸 것이다. 그림 5(b)의 그림은 센서 1과 센서 2 (거리: 200 mm) 사이의 정규화된 상호상관함수 $R_{s_1 s_2}$ 로서 진동신호 도착시간차가 0 샘플을 기준으

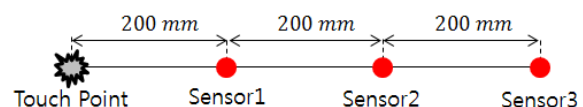


그림 4. 진동파동 전파속도측정.
 Fig. 4. Measurement of vibration wave propagation velocity.

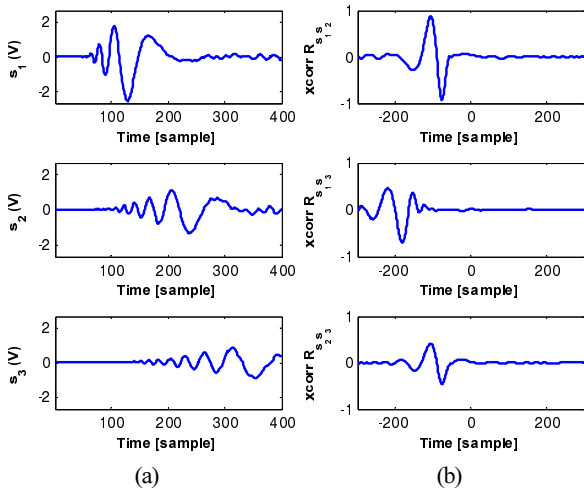


그림 5. 진동파동 전파속도의 추정. (a) 터치 후 각 가속도센서에 계측된 신호 (좌측, 상: s_1 , 중: s_2 , 하: s_3) (b) 계측된 신호의 상호상관함수 (우측, 상: $R_{s_1s_2}$, 중: $R_{s_1s_3}$, 하: $R_{s_2s_3}$).

Fig. 5. Estimation of vibration wave propagation velocity. (a) Measured accelerometers signals after touch (left side, top: s_1 , mid: s_2 , bottom: s_3) (b) Cross-correlation functions of measured accelerometers signals (right side, top: $R_{s_1s_2}$, mid: $R_{s_1s_3}$, bottom: $R_{s_2s_3}$).

로 -108 샘플만큼 지연됨을 보여주고 있으며, 중간 및 아래 그림은 각각 센서1과 센서3 (거리: 400 mm), 그리고 센서2와 센서3(거리: 200 mm) 사이의 정규화된 상호상관함수 $R_{s_1s_3}$, $R_{s_2s_3}$ 로서 시간지연이 각각 -217, -109 샘플임을 보여준다. 이러한 총 3개의 상호상관함수 $R_{s_1s_2}$, $R_{s_1s_3}$, $R_{s_2s_3}$ 의 시간지연으로부터 각 센서간 거리 200 mm 마다 108.5 샘플 차이를 얻을 수 있다.

즉, 진동파동이 200 mm를 이동하는데 걸린 시간은 0.00217 초가 된다. 그러므로 본 시스템에서 진동신호의 전파속도 c 는 92.17 m/s으로 주어진다. 전파속도 c 는 터치위치의 추정에 결정적으로 중요한 요소이며, 사용하는 판의 재료특성에 따라 c 값은 가변적이므로 사전에 미리 계측되어 터치패널 시스템을 구성해야만 한다.

2. 터치위치 추정 알고리즘

그림 6과 같이 터치위치 추정 알고리즘을 DSP보드에서 구현하기 위해 구성하였다. 우선 3개의 센서가운데 중앙에 위치한 센서 2에서 들어오는 신호의 값이 정해진 기준값 이상이 되면 터치가 발생한 것으로 판단하도록 하였다. 센서 신호들을 저장하기 위해 각 2048 샘플들을 저장 가능한 3개의 버퍼를 준비하였다. 각 버퍼는 원형버퍼(circular buffer)로 터치 발생과 무관하게 지속적으로 센서신호를 저장한다. 터치가 발생하면, (즉 $s_2 \geq$ 기준값) 터치 이전의 250 샘플과 터치 후 1798 샘플을 저장한 후 버퍼에 저장하는 것을 종료한다. 그러면 각 버퍼에는 센서 별로 2048 샘플길이의 터치직전부터 직후까지의 신호 s_1, s_2, s_3 가 저장된다. 이때 버퍼에 저장된 신호 s_1, s_2, s_3 에서 센서의 배치위치가 가장 가깝게 위치

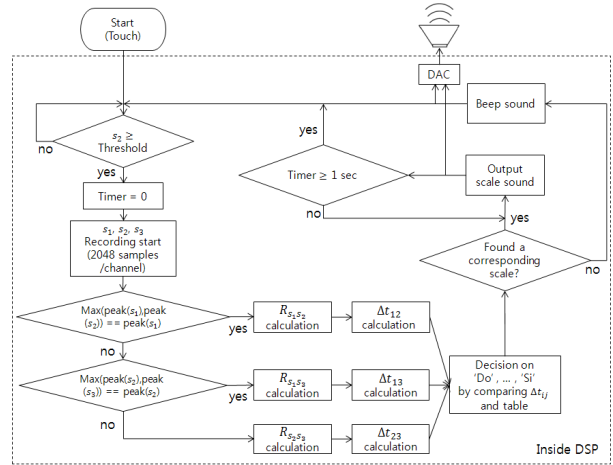


그림 6. 터치위치 추정 알고리즘 흐름도. Fig. 6. A flow chart of touch location estimation algorithm.

표 1. 이론적인 도착시간차와 오차범위.

Table 1. Theoretical arrival time differences and their error boundaries.

	Do	Re	Mi	Fa	Sol	La	Si	
r_1 (m)	0.34525	0.38471	0.45343	0.54037	0.63812	0.74243	0.85088	
r_2 (m)	0.49518	0.41617	0.36056	0.34000	0.36056	0.41617	0.49518	
r_3 (m)	0.85088	0.74243	0.63812	0.54037	0.45343	0.38471	0.34525	
t_1 (s)	0.00375	0.00417	0.00492	0.00586	0.00692	0.00805	0.00923	
t_2 (s)	0.00537	0.00452	0.00391	0.00369	0.00391	0.00452	0.00537	
t_3 (s)	0.00923	0.00805	0.00692	0.00586	0.00492	0.00417	0.00375	
Δt_{12} (s)	Min	-0.00193	-0.00068	0.00068	0.00189	0.00279	0.00338	0.00374
	Center	-0.00163	-0.00034	0.00101	0.00217	0.00301	0.00354	0.00386
	Max	-0.00131	0.00000	0.00134	0.00245	0.00322	0.00369	0.00397
Δt_{13} (s)	Min	-0.00588	-0.00434	-0.00250	-0.00051	0.00151	0.00342	0.00508
	Center	-0.00549	-0.00388	-0.00200	0.00000	0.00200	0.00388	0.00549
	Max	-0.00508	-0.00342	-0.00151	0.00051	0.00250	0.00434	0.00588
Δt_{23} (s)	Min	-0.00397	-0.00369	-0.00322	-0.00245	-0.00134	0.00000	0.00131
	Center	-0.00386	-0.00354	-0.00301	-0.00217	-0.00101	0.00034	0.00163
	Max	-0.00374	-0.00338	-0.00279	-0.00189	-0.00068	0.00068	0.00193

한, 즉 피크치가 가장 큰 신호를 기준으로 상호상관함수 ($R_{s_i s_j}$) 연산을 통해 시간지연을 추정한다. 이 시간지연이 Δt_{ij} 로서 터치로 인한 진동신호가 센서 s_i 와 s_j 에 도착하는 시간지연인 것이다. 구해진 Δt_{ij} 는 센서위치, 피아노건반 및 터치가능원의 치수를 고려하여 미리 정의해둔 표 1의 해당 Δt_{ij} 값과 비교한다.

표 1에는 그림 3에서 정의된 센서위치 및 건반과 터치가능원의 크기를 고려하여 각 건반 별로 각 센서와의 거리 r_1, r_2, r_3 그리고 진동신호 전파속도 c 를 고려한 각 센서까지의 전달시간 t_1, t_2, t_3 를 계산하였다. 또한 각 건반 별 터치가능원 (직경 60 mm) 내부 터치위치에서 각 센서간의 가능한 최대, 최소거리 범위를 고려한 $\Delta t_{12}, \Delta t_{13}, \Delta t_{23}$ 를 각각 미리 도출하였다. 그리고 그림 7의 7개의 터치가능원 외곽선을 따라 각 원의 좌측에는 최소시간지연 그룹(+, o, □), 우측에는 최대시간지연 그룹(▽, △, ◇)들이 위치하는 경향이 나타났다. 이것은 실제 터치 시 터치가능원 내부의 정 중앙 위치를 터치하는 것이 쉽지 않기 때문에 터치시 위치오차를 고려한 것

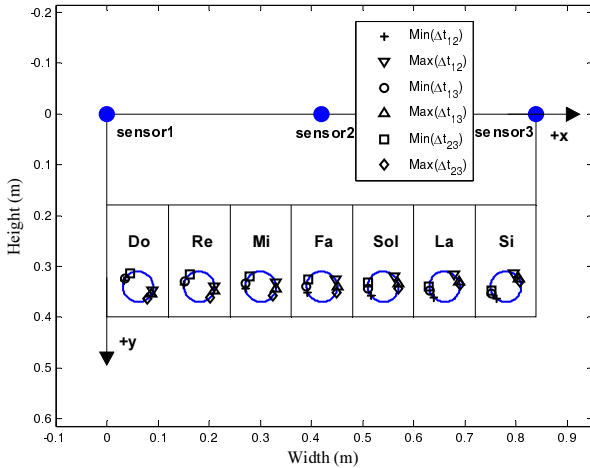


그림 7. Δt_{12} , Δt_{13} , Δt_{23} 의 이론적인 최대최소 범위.

Fig. 7. Maximum and minimum boundaries of theoretical Δt_{12} , Δt_{13} , and Δt_{23} .

이다. 그래서 Δt_{ij} 의 min값, center값, max값을 계산하여 이것을 터치오차 범위로 지정하였고 그림 7에 표현하였다.

즉, 예를 들어 그림 7에 표시된 ‘◻’ 및 ‘◇’ 기호는 각각 센서2와 센서3에서 터치로 인한 센서신호간의 가능한 최소 시간지연 및 최대 시간지연 ($\Delta t_{23} = t_2 - t_3$)을 의미한다. 또한 ‘Do’ 건반에서 ‘Si’ 건반으로 갈수록 최소시간지연그룹과 최대시간지연 그룹은 조금씩 반시계 방향으로 돌고 있으며, ‘Fa’ 를 기준으로 ‘Mi’ 와 ‘Sol’, ‘Re’, ‘La’ 그리고 ‘Do’ 와 ‘Si’ 는 서로 대칭적임을 알 수 있다.

계측한 Δt_{ij} 를 표 1과 비교하여 일치하는 음계를 찾아내어 해당하는 사운드를 스피커를 통해 1 초간 출력한다. 만약 일치하는 음계가 없으면 beep 사운드 출력 후 바로 다음 터치를 대기한다. 이와 같이 1 초마다 1 번씩의 터치입력을 받아 해당음계의 사운드를 출력해주는 피아노 건반 시스템의 알고리즘을 구성하였다.

IV. 실시간 실험 및 결과분석

그림 3에서 제안된 3개의 가속도센서를 이용한 터치패널 시스템의 구현 개념을 기반으로 실제 구현된 시스템 및 실험 장면을 그림 8에 나타내었다.

그림 8과 같이 ‘Do’ 부터 ‘Si’까지 순서대로 하나씩 각 건반의 터치가능원 내부에 터치함과 거의 동시에 해당음계를 스피커에서 소리를 발생시키는 실시간 실험을 2회에 걸쳐 수행하였다. 터치신호는 유성매직펜으로 건반의 정해진 위치에 짧게 임팩트를 가함으로써 만들어냈다. 또한 본 실험을 위해 사용된 터치패널 시스템 구성품 및 사양은 표 2에 나타내었다.

그림 9는 이때 ‘Do’, ..., ‘Si’ 까지 7개의 건반의 터치가능원 내부를 각각 터치 하였을 때 센서 1, 2, 3에서 측정된 시간신호를 7 행 × 3 열로 나타낸 것이다. 그림 9의 1 행은 ‘Do’ 를 터치했을 때 측정된 센서 1(좌측), 센서 2(중앙), 센서 3(우측)의 신호이다. 2 행, 3 행, ..., 7 행은 각각 ‘Re’, ‘Mi’, ..., ‘Si’ 에 해당하는 신호이다. 이렇게 그려진 그림 9로부터 의미 있

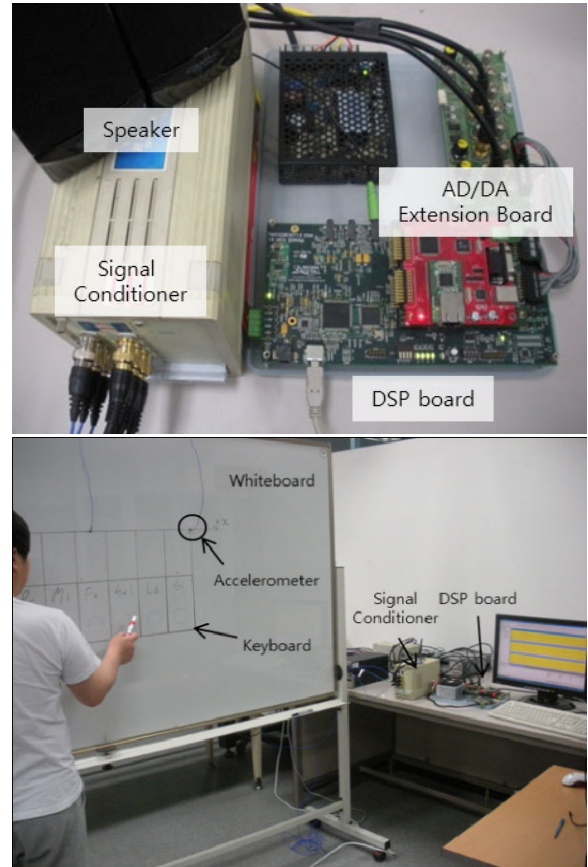


그림 8. 실시간 피아노건반 터치패널시스템 구현 및 실험.

Fig. 8. Real-time implementation and experiment of a piano keyboard touch panel system.

표 2. 터치패널시스템 구성품 및 사양.

Table 2. Touch panel system components and specifications.

Item	Specification	No.
Panel for Touch	Commercial Whiteboard	1
Accelerometer	PCB piezotronics 352C66	3
Signal Conditioner	PCB piezotronics 441A42 4CH	1
AD/DA Board	RealSYS 6713 AD/DA Extension Board 8CH	1
DSP Board	TI TMS320C6713 DSK	1
PC	Trigem PC (Windows XP)	1
Loudspeaker	Trigem Loudspeaker Stereo Type	1 set

는 값인 각 신호의 피크치의 이동변화를 살펴보면 센서 1의 신호인 s_1 은 ‘Do’ 에서 ‘Si’ 로 갈수록 피크치가 점차 우측으로 이동하는 경향을 가진다. s_2 는 피크치가 좌측으로 이동했다가 우측으로 이동한다. s_3 는 피크치가 점차 우측에서 좌측으로 이동하는 경향을 보인다. 이를 통하여 터치위치에서 센서까지의 거리가 피크치의 이동과 비례관계를 가지고 있음이 확인되었다.

그림 10은 그림 9의 결과를 가지고 센서신호 s_1 , s_2 및 s_3 상호상관함수 $R_{s_1s_2}$, $R_{s_1s_3}$ 및 $R_{s_2s_3}$ 를 나타낸 것이다. 그림 6의 터치위치 추정 알고리즘대로 수행하여 s_1 , s_2 및 s_3 중에서 s_1 의 피크치가 가장 크면 s_1 와 s_2 를 이용하고, s_2 의 피

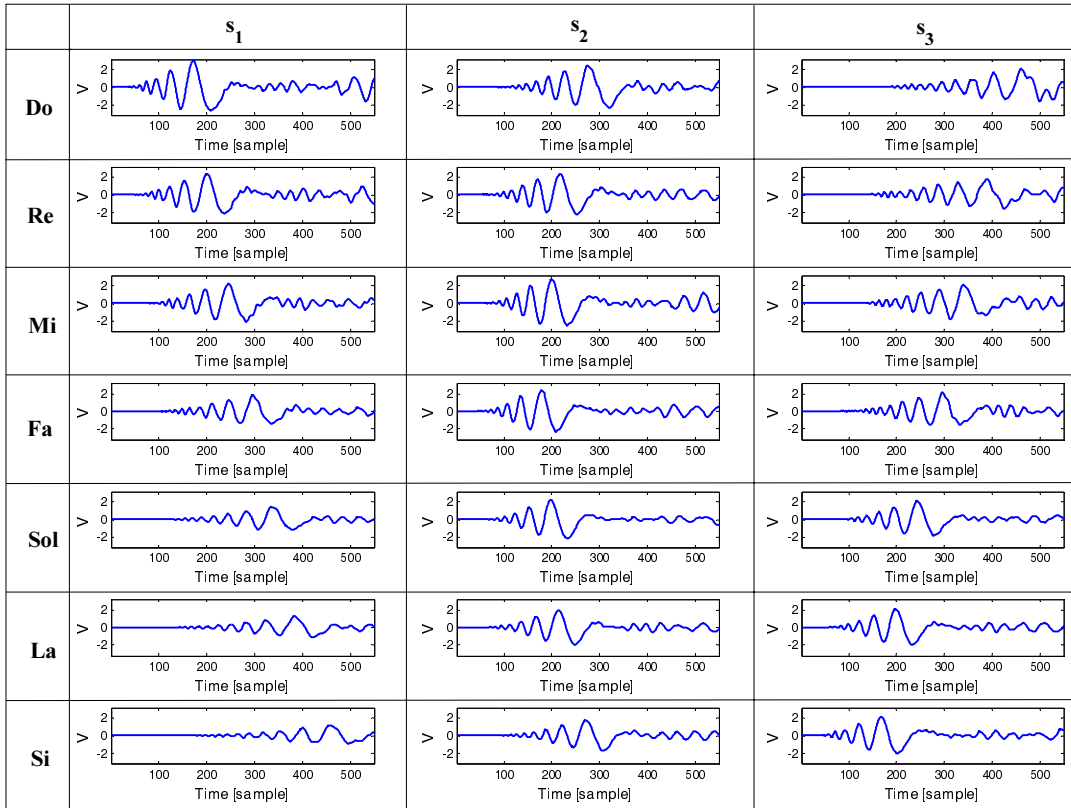


그림 9. 가속도센서 측정신호 ($f_s = 50 \text{ kHz}$).

Fig. 9. Measured signals from three accelerometers.

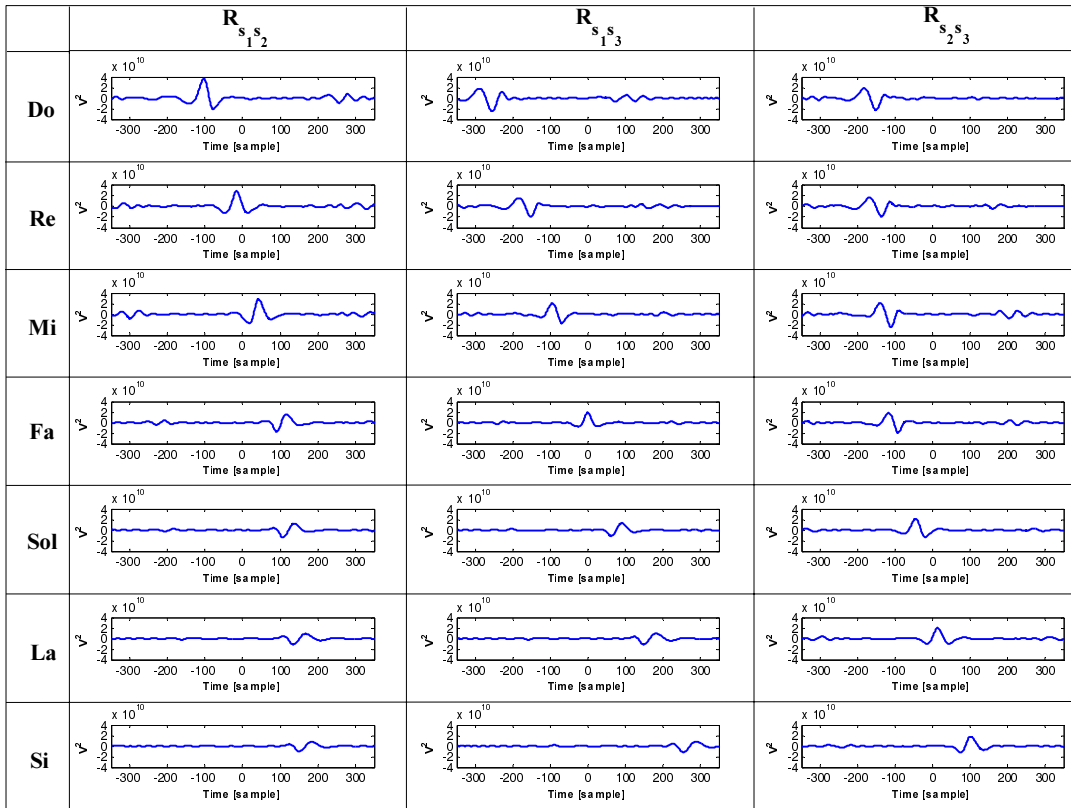


그림 10. 가속도센서 측정신호의 상호상관함수 $R_{s_1 s_2}$, $R_{s_1 s_3}$, $R_{s_2 s_3}$ ($f_s = 50 \text{ kHz}$).

Fig. 10. Cross-correlation functions $R_{s_1 s_2}$, $R_{s_1 s_3}$ and $R_{s_2 s_3}$ of measured signals from accelerometers.

표 3. 측정된 가속도센서 신호의 도착시간차.

Table 3. Measured accelerometers signals of arrival time differences.

		Do	Re	Mi	Fa	Sol	La	Si
1st Test	Δt_{12} (s)	-0.00146	-0.00032	0.00086	0.00194	0.00276	0.00336	0.00368
	Δt_{13} (s)	-0.00516	-0.00368	-0.00188	0.00000	0.00184	0.00366	0.00520
	Δt_{23} (s)	-0.00364	-0.00334	-0.00278	-0.00194	-0.00088	0.00028	0.00144
2nd Test	Δt_{12} (s)	-0.00140	-0.00032	0.00088	0.00204	0.00280	0.00338	0.00366
	Δt_{13} (s)	-0.00502	-0.00368	-0.00182	0.00008	0.00186	0.00370	0.00516
	Δt_{23} (s)	-0.00362	-0.00334	-0.00276	-0.00192	-0.00088	0.00032	0.00142

크치가 가장 크면 s_1 와 s_3 를 이용하며, s_3 의 피크치가 가장 크면 s_2 와 s_3 를 이용하여 상호상관함수를 각각 구한다.

즉 터치위치의 음계를 추정하기 위하여 ‘Do’와 ‘Re’ 음계는 알고리즘에 의해 $R_{s_1s_2}$ 가 사용되어지고, ‘Mi’, ‘Fa’ 및 ‘Sol’ 음계는 $R_{s_1s_3}$ 가 선택되어지며, ‘La’, ‘Si’ 음계는 $R_{s_2s_3}$ 가 채택 되어진다.

각각의 상호상관함수 $R_{s_1s_2}$, $R_{s_1s_3}$, $R_{s_2s_3}$ 가 그려졌다. 이때 각각의 피크치에 해당하는 샘플번호와 0 샘플번호와의 샘플 개수 차이로부터 각각의 시간지연 Δt_{12} , Δt_{13} 및 Δt_{23} 를 구할 수 있다. 여기서 $\Delta t_{ij} = \Delta n_{ij} \times f_s$, Δn_{ij} 는 시간지연 샘플 개수 차이이고, f_s 는 샘플링 주파수 (Hz)이다. 이렇게 계산된 시간지연을 이론적인 값과 비교하여 터치위치의 음계를 판단 하였다.

표 3은 두 번의 실험에서 실제로 측정된 신호의 상호상관 함수를 연산하여 센서간의 시간지연을 구한 것이다. 진한 글씨체 부분은 그림 6에 그려진 본 시스템의 터치위치 추정 알고리즘에 채택된 값을 표시한 것이다.

실제 비교할 값은 표 1과 3에서 진한 글씨체 부분이다. 먼저 표 3에서 보는 것과 같이 ‘Do’의 Δt_{12} 실측값은 2번의 테스트결과 -0.00146 초와 -0.00140 초로 표 3에서 이론적인 Δt_{12} 의 ‘Do’ 음계의 오차범위인 -0.00131 초 ~ -0.00193 초 사이에 들어가므로 ‘Do’ 음계로 결정되고 ‘Do’에 해당하는 소리를 스피커를 통해 발생시켰다. 같은 방법으로 나머지 음계에 대해서도 실시간의 실측의 데이터인 표 3과 이론 계산의 표 1을 비교하여 터치패널시스템이 실시간의 피아노 건반과 같이 동작하도록 하였다. 건반에 대한 터치시간간격은 최소 1 초로 정하였으며, 1 초 이상의 간격으로 연속적으로 터치하여도 해당음계의 소리를 발생시키며 실시간으로 정상적으로 동작하였다.

그리고 실제 테스트 도중 측정된 센서신호를 기반으로 식 (7)을 이용해서 터치위치 (x, y)를 추정해 보았더니, 그림 11과 같이 나타났다. 이로써 터치위치들은 정확히 터치된 음계 위치들을 역추적해냄을 보여주었다. 이상과 같은 실시간 실험을 통해 본 가속도센서를 이용한 터치패널시스템은 비록 단순하지만 매우 강력하게 동작할 수 있음을 보여주었다.

이와 같은 터치패널시스템은 터치패널의 크기에 비해 제작비용이 상대적으로 저렴하며, 진동과동이 유발 가능한 대부분의 평판에 적용 가능함이 큰 장점이다. 터치위치에 대한 해상도(resolution)의 향상을 위해서는 현재의 샘플링 주파수보다 더욱 높은 샘플링 주파수가 요구된다. 파동 전파속도

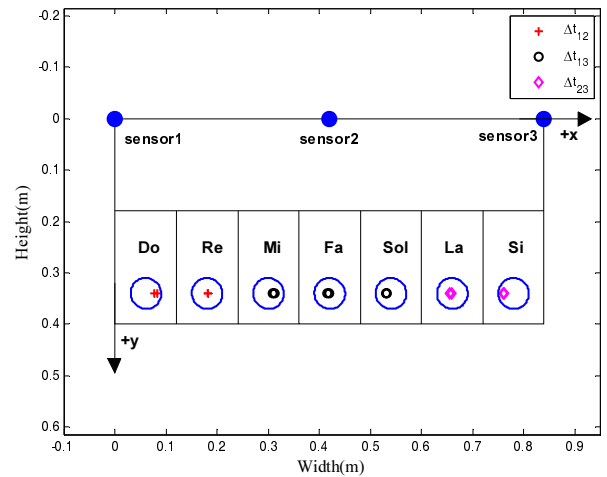


그림 11. Δt_{12} , Δt_{13} , Δt_{23} 로 찾은 터치위치 추정.

Fig. 11. Estimated the fittest touch location using Δt_{12} , Δt_{13} and Δt_{23} .

$c = 92.17 \text{ m/s}$ 이므로, 1샘플당 $92.17 \text{ m/s} / 50,000 \text{ Hz} = 1.8\text{mm}$ 의 위치 해상도를 가지고 있다. 그래서 2배 높은 샘플링 주파수는 2배 높은 위치해상도를 제공해 줄 수 있다.

그리고 본 시스템에서는 멀티터치 및 드래그 모션은 아직 고려 하지 않았다. 그러나 2점 동시터치는 신호처리의 문제로 상호상관함수 그림에 2개의 피크치가 나타나게 되는 경우로서, 이론적으로 충분히 두 터치위치를 찾을 수 있다. 단지, 2점 이상 동시터치의 경우 개별터치간의 시간간격이 신호저장을 위한 버퍼의 배열 크기 및 샘플링 주파수에 따라 제한적이 된다. 즉, 개별 터치간에 시간상의 엇박자를 최소화 시키면 구현이 가능하리라고 판단된다.

V. 결론

본 연구에서는 가속도센서들을 상용 화이트보드에 부착하여 실시간 피아노건반 터치패널시스템을 구현해보았다. 터치위치를 추정하기 위해서 화이트보드상에서 발생하는 물리적인 현상을 해석하였고, 이를 통해 터치로 인한 진동파형의 전파속도와 각 센서간의 진동파형 도착시간지연이 터치위치를 결정하는 인자임이 확인되었다. 그래서 TDOA 기법을 적용한 터치위치추정 알고리즘을 개발하였으며 이는 DSP보드에 실시간으로 처리가 가능하도록 구현되어 실시간 피아노건반 터치패널시스템이 동작되도록 하였다.

구현된 시스템은 화이트보드상에 피아노와 유사한 7개의 건반을 도시하였고, 그 건반의 상부에 3개의 가속도센서를 등 간격으로 배치하였으며 센서신호들은 DSP보드로 전달되어 개발된 알고리즘으로 실시간 터치위치를 추정하여 해당 음계의 소리를 발생하도록 하였다. 실험결과 본 터치패널시스템은 상대적으로 매우 단순한 구조를 가짐에도 불구하고, 정확한 터치건반 위치를 찾아내어 그 유용성이 확인되었다.

본 논문에서 제안된 터치패널시스템은 단지 3개의 가속도센서 및 고속의 신호처리 전용보드를 사용하므로 기존의 터치패널에 비해 매우 단순한 구조를 가진다. 아울러 가속도센서가 탐지 가능한 진동이 유발되는 평판들은 이 방법으로

간단하게 터치패널로 변환시킬 수 있는 큰 장점이 있다.

추후 멀티 터치와 드래그(drag) 기능을 추가할 수 있게 되면 이러한 터치패널시스템은 확대되어가는 터치패널에 대한 시장요구에 새로운 기술로써 적용될 수 있을 것이라 판단된다.

참고문헌

- [1] Displaybank, "Issues on touch panels and market analysis 2011," *Displaybank (in Korean)*, 2011.
- [2] Electronic Resource Inc., "Recent touch panel market and technology trends," *Semiconductor & FPD Monthly (in Korean)*, vol. 254, pp. 74-81, May 2009.
- [3] L. R. Kasday, "Touch position sensitive surface," Pat. no. 4484179, USA, 1984.
- [4] S. Jung, O.-J. Kwon, and Y.-J. Jeong, "Design of an infrared multi-touch screen controller using stereo vision," *The Institute of Electronics Engineers of Korea - Semiconductor and Devices (in Korean)*, vol. 47-SD, no. 2, pp. 68-76, Feb. 2010.
- [5] D.-S. Park, D.-J. Kim, B.-H. O, S.-G. Park, E.-H. Lee, and S. G. Lee, "Design of internal coupling structure for touch panel devices using optical coupling of a pen-shaped light source with optical waveguides," *Hankook Kwanghak Hoeji (in Korean)*, vol. 20, no. 2, pp. 128-133, Apr. 2009.
- [6] C. H. Knapp and G. C. Carter, "The generalized correlation method for the estimation of time-delay," *IEEE Transaction on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, vol. 24, no. 4, pp. 320-327, 1976.
- [7] K. H. Lee, C. H. Yu, J. W. Choi, and Y. B. Seo, "ToA based sensor localization algorithm in underwater wireless sensor networks," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems (in Korean)*, vol. 15, no. 6, pp. 641-648, Jun. 2009.
- [8] B. Kwon, Y. Park, and Y. Park, "Spatially mapped GCC function analysis for multiple source and source localization method," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems (in Korean)*, vol. 16, no. 5, pp. 415-419, May 2010.

- [9] F. J. Fahy, *Sound and Structural Vibration- Radiation, Transmission and Response*, Academic Press, London. 1985.
- [10] J. S. Bendat and A. G. Piersol, *Random Data*, John Wiley & Sons. 1991.



이 영 섭

1987년 부산대학교 조선공학과(공학사). 1997년 University of Southampton, ISVR(공학석사). 2000년 University of Southampton, ISVR(공학박사). 국방과학연구소 연구원, Research Fellow in University of Southampton, 한국표준과학연구원 책임연구원, 전북대학교 기계공학과 조교수. 2007년~현재 인천대학교 임베디드시스템공학과 부교수. 관심분야는 능동음향진동제어, 신호처리, 스마트센서.



김 동 일

2010년 인천대학교 멀티미디어시스템공학과 졸업. 2010년~현재 인천대학교 대학원 임베디드시스템공학과 석사과정 재학중. 관심분야는 실시간제어, 신호처리, 스마트센서.



강 민 수

2009년 세명대학교 소프트웨어학과 졸업. 2010년~현재 인천대학교 대학원 임베디드시스템공학과 석사과정 재학중. 관심분야는 스마트센서, 임베디드시스템 설계.