

논문 2009-46SD-6-4

터치키 응용을 위한 풀 디지털 정전용량 센서

(A Full Digital Capacitive Sensor for Touch Key Applications)

성 광 수*, 이 무 진**

(Kwang Su Seong and MuJin Lee)

요 약

본 논문에서는 터치키에 응용할 수 있는 풀 디지털 방식의 정전용량 센싱 기법을 제안한다. 제안된 회로는 측정하고자 하는 정전용량 두 개와 두 정전용량 사이 저항으로 구성된다. 각 정전용량과 저항으로 지연을 측정한 후 두 지연의 차이로 측정하고자 하는 두 정전용량의 차이를 구하는 방식으로 동작전압, 온도, 습도와 같은 동작환경변화의 영향을 완화시킬 수 있는 장점이 있다. 실험결과 제안된 방식의 정전용량 해상도가 1.02pF이어서 터치키에 적용할 수 있음을 보였다.

Abstract

In this paper, a full-digital capacitive sensor for touch key applications is proposed. The proposed circuit consists of two capacitive loads to measure and a resistor between the capacitive loads. As the method measures the delays of the resistor and two capacitive loads respectively, and obtains difference between the capacitive loads by subtracting the two delays, it can reduce the effects of changing of operating environment variables such as supplying voltage, temperature and humidity. Experimental results show the method has 1.02pF resolution and can be applied to touch key applications.

Keywords : 정전용량센서, 터치키

I. 서 론

정전용량 센싱을 이용한 터치키는 MP3플레이어, 휴대폰, TV, 모니터 등의 키패드 및 스위치에 사용되고 있으며, 기계식에 비해 누르는 느낌과 새로운 디자인에 적용 가능하여 점차 사용범위가 넓어지고 있다. 정전용량을 이용한 터치키는 도체판에 손가락이 접근할 때 정전용량이 커지는 것을 센싱하는 방법이 대표적이다^[1~2].

터치키는 디지털 방식과 아날로그 방식으로 구분할 수 있다. 여기서 아날로그 방식이란 ADC, OP-AMP 등과 같은 아날로그 소자를 이용하는 방식을 의미하고^[3~5], 디지털 방식이란 디지털 소자를 이용해 정전용량을

측정하는 방식을 의미한다. 디지털 방식은 아날로그 방식에 비해 구현하기가 쉬우며 새로운 반도체 공정에 쉽게 이식할 수 있는 장점을 가지고 있다. 또한 CMOS 반도체 공정이 수십nm로 발전하고 있음에도 불구하고 아날로그 회로는 공정발전만큼 칩 면적이 줄지 않는다는 문제점이 있다. 그리고 새로운 반도체 공정에 적용하기 위해서는 해당 공정에 맞게 새롭게 아날로그 회로를 개발해야 하므로 제품 개발 기간이 길어지는 문제점이 있다.

디지털 방법은 RC 발진기를 이용해 클럭을 생성한 후 주파수를 카운트하거나 주기를 측정하는 방법으로 정전용량을 측정한다. 이 방법은 표준셀(standard cell)과 같은 디지털 소자를 이용해 구현할 수 있으나 외부 온도, 공급전압, 습도 등 다양한 동작환경에 따라 측정되는 RC지연값 및 RC발진 주파수 변동이 있어서 정확도가 떨어지는 문제점이 있다^[3].

본 논문에서는 동작환경변화에 따른 문제점을 완화시킬 수 있는 RC지연 방식의 정전용량 측정 방법을 제

* 정회원, 영남대학교 전자정보공학부
(School of Electronic Eng., Communication Eng., & Computer Science, Yeungnam University)

** 학생회원, 영남대학교 전자공학과
(Department of Electronic Engineering, Yeungnam University)

접수일자: 2008년10월17일, 수정완료일: 2009년5월7일

안한다. 제안된 방법에서는 측정하고자 하는 두 개의 정전용량을 한 쌍으로 동작시키며 이들 두 정전용량의 차이를 구하는 방법이다. 터치키에서 도체에 손가락이 접근될 때 수십 pF에서 수백 pF의 정전용량 변화가 발생하는데, 실험결과 제안된 방법은 1.02pF의 해상도를 가져 터치키로 사용할 수 있음을 확인하였다. II장에서는 기존 방법과 제안된 방법에 대해 설명하고, III장에서는 실험, 그리고 IV장에서는 결론에 대해 설명한다.

II. RC지연을 이용한 정전용량 측정기법

1. RC 지연측정 기본 회로

그림 1(a)는 RC 지연을 이용한 정전용량 측정 회로로 금속판(plate)과 손가락 사이에 유기되는 정전용량 C_{sensor} 를 측정한다. 그림 1(a) 회로도도 디지털 소자를 이용해 그림 1(b)와 같이 구현할 수 있다. 비교기와 V_{TH} 는 슈미트 트리거(schmitt trigger) 입력 버퍼를 이용하면 되고, 초기에 V_{sensor} 를 0V로 초기화 하는 부분과 저항은 오픈드레인(open-drain)을 이용하면 된다. 그림 1(c)에서는 금속판(plate)을 등가회로로 나타냈으며 C_0 는 금속판에 유기되는 기생정전용량을 나타낸 것

이다.

RC 지연을 측정하기 위해 커패시터를 방전한 후 저항을 통해 전류를 공급하면 커패시터의 전압이 상승한다. 커패시터 전압 V_{sensor} 와 비교전압 V_{TH} 를 비교하여 $V_{sensor} < V_{TH}$ 구간의 시간을 측정한다. 그림 1(a) 회로에서 V_{sensor} 를 구하면 수식 (1)과 같으며 $t = T_{delay}$ 일 때 $V_{sensor} = V_{TH}$ 가 되므로 (1)식을 이용하면 T_{delay} 는 수식 (2)와 같이 표현된다.

$$V_{sensor}(t) = V_{DD}[1 - e^{-t/R(C_{sensor} + C_0)}] \quad (1)$$

$$T_{delay} = R(C_{sensor} + C_0) \ln \frac{V_{DD}}{V_{DD} - V_{TH}} \quad (2)$$

식 (2)에서 T_{delay} 값이 C_{sensor} 에 비례함을 알 수 있으며, T_{delay} 값을 디지털 값으로 변환한 카운터 출력값 N_{delay} 역시 C_{sensor} 에 비례함을 알 수 있다. 여기서 N_{delay} 는 식 (3)과 같으며 T_{CLK} 는 CLK의 주기를 나타낸다.

$$N_{delay} = \left\lceil \frac{T_{delay}}{T_{CLK}} \right\rceil \quad (3)$$

$$= \left\lceil \frac{R(C_{sensor} + C_0) \ln \frac{V_{DD}}{V_{DD} - V_{TH}}}{T_{CLK}} \right\rceil$$

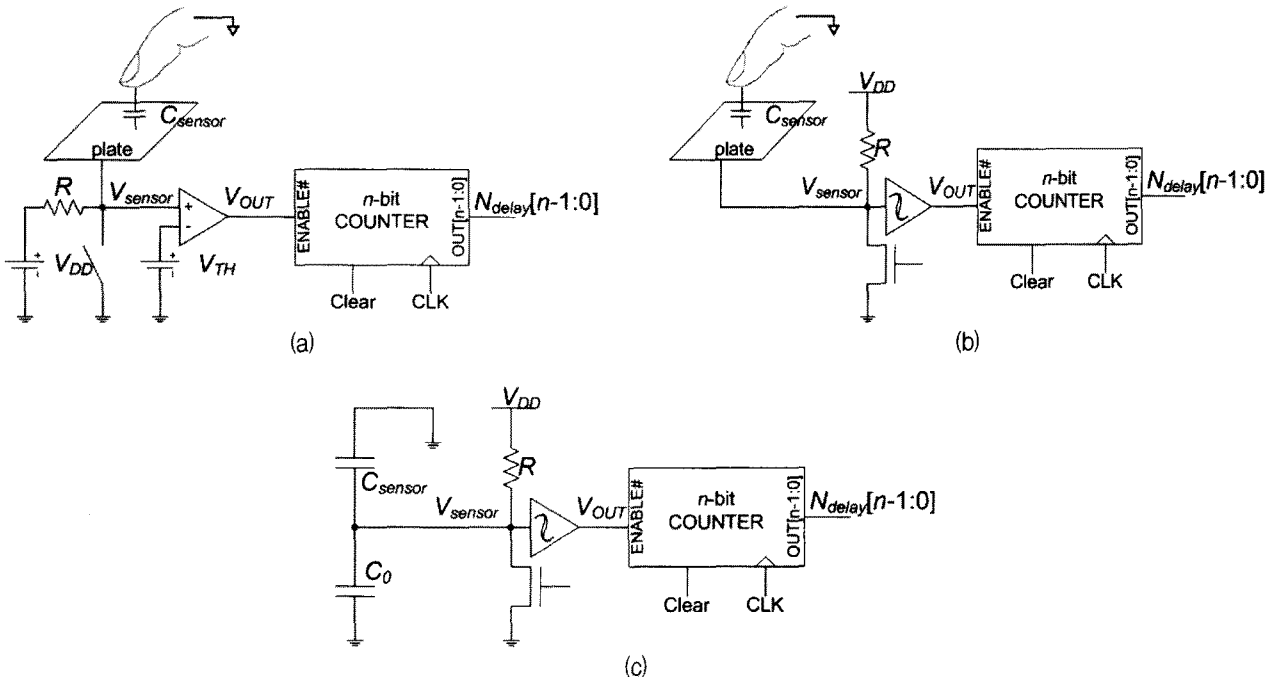


그림 1. RC 지연을 이용한 정전용량 측정 방법

(a) 기본 회로도, (b) 디지털소자를 이용한 구현, (c) 도체판 등가회로

Fig. 1. Capacitance sensing method using RC delay.

(a) basic circuit, (b) implementation using digital component, (c) equivalent circuit of plate

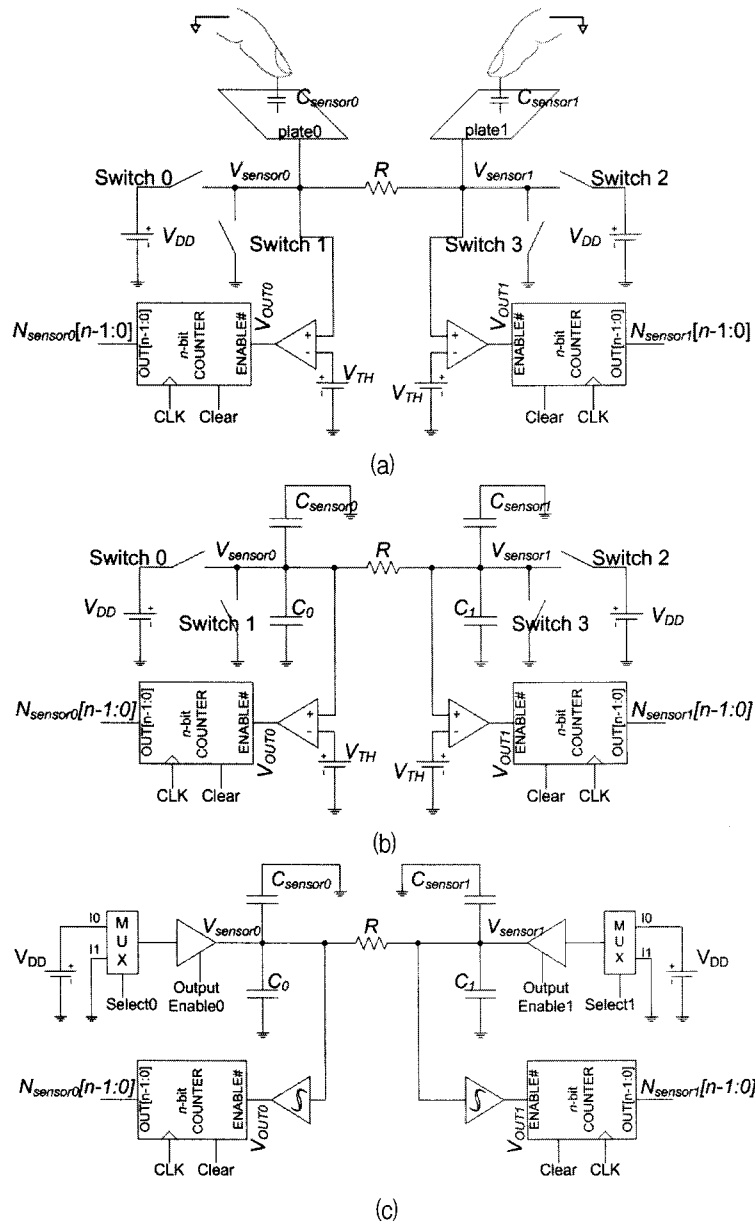


그림 2. 제안된 정전용량 측정 회로

(a) 기본 회로도, (b) 도체판 등가회로, (c) 디지털회로로 구현

Fig. 2. Proposed capacitance sensing circuit.

(a) basic circuit, (b) equivalent circuit of plates, (c) implemented using digital circuits

이 방식은 I 장에서 언급한 것과 같이 외부온도, 공급전압, 습도 등과 같은 동작환경 변화에 따라 T_{delay} 가 변화되는 문제점을 가지고 있어 이에 대한 보정이 필요하다^[3].

2. 제안된 방법

본 논문에서 제안한 방법은 측정하고자 하는 정전용량 두 개를 한 쌍으로 구성하여 측정하는 방식으로 그림 2(a)와 같다. 그림 2(b)는 두 개의 도체판(plate)을 등가회로로 나타낸 것이다. 여기서 도체판0의 기생정전용량을

C_0 그리고 도체판 1의 기생정전용량을 C_1 로 표시하였다.

제안된 방법은 브리지형식의 구조를 가지며 양 방향에서 RC 지연을 측정하고 이의 차이를 이용해 도체판 1과 도체판 2에 유기된 정전용량의 차이를 구하고 이를 이용해 터치기가 눌리졌는지를 판단한다.

그림 2(c)는 제안된 방법을 풀 디지털 방식으로 구현한 회로이다. 앞에서와 같이 비교기와 V_{TH} 는 슈미트 트리거 (schmitt trigger) 입력 버퍼를 이용하면 되고, 스위치0과 1은 삼상버퍼와 2개의 입력을 갖는 멀티플렉서를 이용하

여 구현할 수 있으며, 스위치2와 3역시 삼상버퍼와 멀티플렉서를 이용해 구현할 수 있다.

제안된 회로의 동작 순서는 다음과 같다.

Step 1: 스위치 1과 3을 이용해 $V_{sensor0}$ 과 $V_{sensor1}$ 의 전압을 0으로 초기화 한다.

Step 2: R 과 $C_{sensor1}$ 의 지연을 구하기 위해 스위치 0을 연결하여 V_{OUT1} 이 1이 될 때까지의 지연을 측정한다. 측정된 지연을 CLK 기준으로 양자화 한 값 $N_{sensor1}$ 은 수식 (4)와 같아진다.

$$N_{sensor1} = \left\lceil \frac{T_{sensor1}}{T_{CLK}} \right\rceil = \left\lceil \frac{R(C_{sensor1} + C_1)}{T_{CLK}} \ln \frac{V_{DD}}{V_{DD} - V_{TH}} \right\rceil \quad (4)$$

Step 3: 스위치 1과 3으로 $V_{sensor0}$ 과 $V_{sensor1}$ 을 0V로 초기화 한다.

Step 4: R 과 $C_{sensor0}$ 의 지연을 구하기 위해 스위치 2를 연결하여 V_{OUT0} 이 1이 될 때까지 지연을 측정한다. 측정된 지연을 CLK 기준으로 양자화 한 값 $N_{sensor0}$ 은 수식 (5)와 같아진다.

$$N_{sensor0} = \left\lceil \frac{T_{sensor0}}{T_{CLK}} \right\rceil = \left\lceil \frac{(RC_{sensor0} + C_0)}{T_{CLK}} \ln \frac{V_{DD}}{V_{DD} - V_{TH}} \right\rceil \quad (5)$$

이렇게 측정된 두 지연의 차이를 이용해 수식 (6)을 만들 수 있고 여기서 양자화 오차를 무시하면 측정하고자 하는 두 정전용량 $C_{sensor1}$ 과 $C_{sensor0}$ 의 차이를 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} N_{sensor1} - N_{sensor0} &= \left\lceil \frac{T_{sensor1}}{T_{CLK}} \right\rceil - \left\lceil \frac{T_{sensor0}}{T_{CLK}} \right\rceil \\ &\approx \frac{R}{T_{CLK}} (C_{sensor1} - C_{sensor0}) \ln \frac{V_{DD}}{V_{DD} - V_{TH}} \\ &\quad + \frac{R}{T_{CLK}} (C_1 - C_0) \ln \frac{V_{DD}}{V_{DD} - V_{TH}} \end{aligned} \quad (6)$$

이 방법은 $N_{sensor1}$ 과 $N_{sensor0}$ 을 측정하는 회로에 공급되는 전압과 주변 온도가 같으므로 전압 및 온도 변화에 따른 환경 변화를 완화시킬 수 있음을 알 수 있다. 또한 습도 변화에 의해 $C_{sensor0}$ 과 $C_{sensor1}$ 이 동시에 영향을 받으므로

습도변화에 따른 문제점도 완화시킬 수 있다.

제안된 회로를 이용해 터치키를 구현할 때 잡음 문제를 완화하기 위해 $N_{sensor1}$ 과 $N_{sensor0}$ 을 m 번 측정 후 이의 평균값을 이용한다. 여기서 수식 (7)과 같이 함수 $FuncG$ 를 정의한다.

$$FuncG = \frac{\sum_{i=1}^m (N_{sensor1} - N_{sensor0})}{m} = \frac{\sum_{i=1}^m N_{sensor1} - \sum_{i=1}^m N_{sensor0}}{m} \quad (7)$$

수식(7)을 이용한 터치키 알고리즘은 그림 3과 같으며 $FuncG > G_1$ 이면 도체판1이 눌려진 것이고, $FuncG < G_0$ 이면 도체판0이 눌려진 것으로 판단한다. 이때 G_0 과 G_1 는 임의의 상수로 G_1 이 G_0 보다 크며 실험적 데이터로 설정되는 값이다.

제안된 방법의 해상도(resolution)와 민감도(sensitivity)를 알아보기로 한다. 이상적인 경우 즉 잡음이 없을 경우 매번 $N_{sensor1}$ 과 $N_{sensor0}$ 을 측정하여도 같은 값이 유지되며, 양자화를 고려하지 않으면 수식 (7)은 (8)과 같이 전개된다.

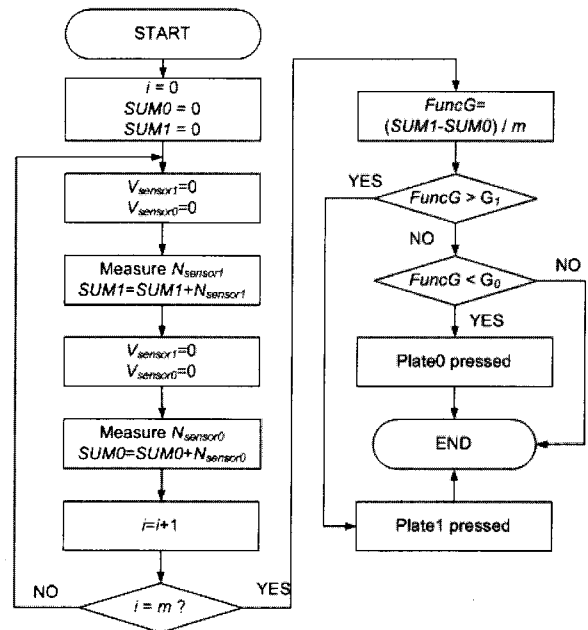


그림 3. 제안된 정전용량 측정방법을 이용한 터치키 동작순서

Fig. 3. Operation sequence of touch key using proposed capacitive sensor.

$$\begin{aligned}
 FuncG &= \frac{\sum_{i=1}^m (N_{sensor1} - N_{sensor0})}{m} \quad (8) \\
 &= N_{sensor1} - N_{sensor0} \\
 &\approx \frac{R}{T_{CLK}} (C_{sensor1} - C_{sensor0}) \ln \frac{V_{DD}}{V_{DD} - V_{TH}} \\
 &+ \frac{R}{T_{CLK}} (C_1 - C_0) \ln \frac{V_{DD}}{V_{DD} - V_{TH}}
 \end{aligned}$$

민감도를 측정하기 위해 $C_{sensor0}$ 을 고정시키고 $C_{sensor1}$ 을 변화하면서 $FuncG$ 를 측정한다. 이 경우 민감도는 수식 (9)와 같아진다.[6] 민감도는 측정하려는 정전용량의 변화에 따른 측정함수 $FuncG$ 의 변화량을 의미하며 $FuncG$ 그래프에서 직선의 기울기에 해당된다.

$$S = \frac{\delta FuncG}{\delta C_{sensor1}} = \frac{R}{T_{CLK}} \ln \frac{V_{DD}}{V_{DD} - V_{TH}} \quad (9)$$

해상도(resolution)는 측정할 수 있는 가장 작은 정전용량 변화량을 의미하며 수식 (9)로부터 수식(10)과 같아진다.[6] $FuncG$ 는 실험을 통해 측정할 수 있으며, 이의 해상도를 알게 되면 그로부터 측정하고자 하는 정전용량의 해상도를 식(10)을 통해 구할 수 있다.

$$\delta C_{sensor1} = \frac{\delta FuncG}{S} \quad (10)$$

III. 실험 및 고찰

제안된 방법의 특성을 측정하기 위해 그림 4와 같이 FPGA를 이용해 제안된 회로를 구현하였다. 슈미트트리거 입력은 TTL을 이용하였고 이를 제외한 나머지 디지털 회로는 Altera사의 Cyclone II FPGA를 이용해 구현하였다. 제안된 회로는 8개의 터치키가 지원되도록 설계 되었으며 전체 게이트 수(gate count)는 8,000개 정도 되고 20MHz에서 동작함을 확인하였다. 측정할 데이터 수집을 위해 제안된 회로는 I2C 인터페이스를 지원하며 이를 통해 MCU에서 제안된 회로의 컨트롤 레지스터를 접근할 수 있다. 또한 MCU의 UART를 통해 PC와 인터페이스 할 수 있게 하였다.

제안된 방법의 해상도(resolution)를 구하기 위해 $C_{sensor0}$ 에 1pF를 연결한 후 $C_{sensor1}$ 값을 1pF ~ 10pF까지 변경하면서 $FuncG$ 를 구하였다. $FuncG$ 를 측정할 때 수식 (7)에서 m 은 30으로 하였다. 일반적으로 m 을 증가시키면 해상도가 향상되지만 m 을 무한정 키운다고 해서 분

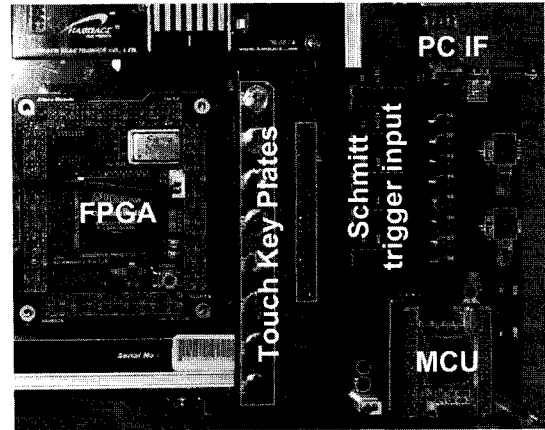


그림 4. 제안된 회로를 FPGA를 이용해 구현한 사진
Fig. 4. The picture shows the proposed circuit implemented using FPGA.

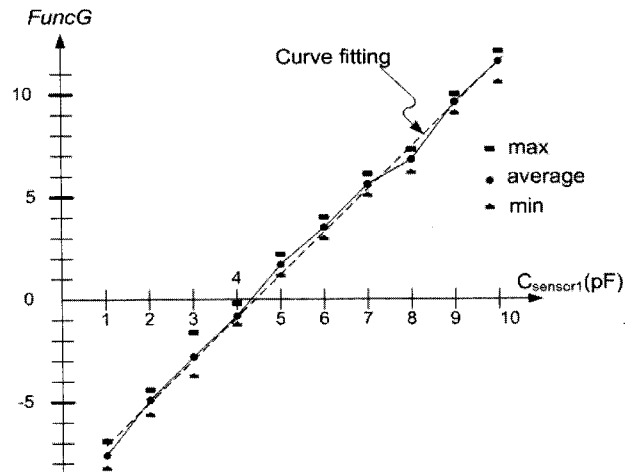


그림 5. 정전용량 $C_{sensor0}$ 을 1pF으로 고정한 후 $C_{sensor1}$ 변화에 따른 $FuncG$ 측정 그래프.
Fig. 5. $FuncG$ versus capacitance $C_{sensor1}$ with fixed 1pF $C_{sensor0}$.

해능력이 향상되는 것은 아니므로 실험에 의해 m 을 30으로 정하였다.

실험에서 $FuncG$ 를 n (=1,000)번 측정하여 이들의 평균값, 최저값과 최대값을 구하였다. 수식 (9)에서와 같이 저항 값이 커지면 민감도가 증가하지만 저항에 의한 잡음과 큰 저항으로 인해 측정하고자 하는 정전용량이 외부 잡음에 취약해지는 문제점이 발생한다. 실험결과 100KΩ일 때 좋은 결과를 보였으며 이때 측정할 정전용량에 대한 $FuncG$ 의 그래프는 그림 5와 같다.

그림 5에서 최소제곱에러방식을 이용해 평균값의 직선 방정식을 구하여 점선으로 표시하였다. 직선의 방정식은 $FuncG = 2.08 C_{sensor1} - 9.15$ 가 된다. 여기서 직선의 기울기가 민감도 S 에 해당된다. 그래프가 원래 기대한 것보다 아래로 내려갔지만 이는 PCB 설계시 전선의 정전

용량 등에 의해 발생하는 것으로 보인다.

정전용량을 n 번 측정할 때 최대값과 최소값이 발생하고, 그래프에서 (최대값 - 최소값) 중 가장 큰 오차는 $C_{sensor1}$ 이 3pF일 때 2.13이므로 $\delta FuncG$ 의 최대값이 2.13이 되고 수식 (10)에 의해 해상도는 $\delta C_{sensor1} = \frac{\delta FuncG}{S} = \frac{2.13}{2.08} = 1.02pF$ 이 됨을 알 수 있다.

IV. 결 론

본 논문에서는 풀 디지털 방식의 터치키 응용을 위한 정전용량 센싱 기법을 제안하였다. 제안된 방법은 정전용량 한 쌍과 정전용량 사이의 저항으로 구성되어 있으며, 저항과 각 정전용량의 지연을 측정해 두 정전용량 차이를 측정하는 방식이다. 제안된 방법은 전압, 온도, 습도와 같은 동작환경변화의 영향을 완화시킬 수 있는 장점이 있으며 측정결과 1.02pF의 정전용량 해상도를 보여 터치키에 적용할 수 있음을 보였다.

참 고 문 헌

- [1] Wayne Palmer, "Building a reliable capacitive-sensor interface," <http://www.planetanalog.com>, June 2008.
- [2] David Marsh, "Capacitive touch sensors gain fans," <http://www.ednasia.com>, Sep. 2006.
- [3] Larry K. Baxter, "Capacitive sensors: Design and applications," John Wiley, 1996.
- [4] Xiujun Li, Gerard C.M.Meijer, "An accurate interface for capacitive sensors," IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement, vol.51, no. 5, pp. 935-939, Oct. 2002.
- [5] Cheng-Ta Chiang, Yu-Chung Huang, "A semicylindrical capacitive sensor with interface circuit used for flow rate measurement," IEEE Sensors Journal, vol.6, no.6, pp. 1564-1570, Dec. 2006.
- [6] Nils Karlsson, "A study of a high-resolution linear circuit for capacitive sensors," IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement, vol. 48, no. 6, pp. 1122-1124, Dec. 1999.

저 자 소 개



성 광 수(정회원)

1990년 한양대학교 전자공학과
학사 졸업.

1992년 한국과학기술원
전기 및 전자공학과
석사 졸업.

1997년 한국과학기술원 전기 및
전자공학과 박사 졸업.

1999년~현재 영남대학교 전자공학과 부교수.

<주관심분야 : 반도체 설계, I/O 인터페이스>



이 무 진(학생회원)

2006년 영남대학교 컴퓨터공학과
학사 졸업.

2008년 영남대학교 전자공학과
석사 졸업.

2008년~현재 영남대학교
전자공학과 박사 과정.

<주관심분야 : 반도체, SoC, 마이크로프로세서>