

Zynq-SoC를 이용한 초음파 위치추적 시스템

An Ultrasonic Positioning System Using Zynq SoC

강 문 호*
(Moon-Ho Kang)

Abstract - In this research, a high-performance ultrasonic positioning system is proposed to track the positions of an indoor mobile object. Composed of an ultrasonic sender (mobile object) and a receiver (anchor), the system employs three ultrasonic time-of-flight (TOFs) and trilateration to estimate the positions of the object with an accuracy of sub-centimeter. On the other hand, because ultrasonic waves are interfered by temperature, wind and various obstacles obstructing the propagation while propagating in air, ultrasonic pulse debounce technique and Kalman filter were applied to TOF and position calculation, respectively, to compensate for the interference and to obtain more accurate moving object position. To perform tasks in real time, ultrasonic signals are processed full-digitally with a Zynq SoC, and as a software design tool, Vivado IDE(integrated design environment) is used to design the whole signal processing system in hierarchical block diagrams. And, a hardware/software co-design is implemented, where the digital circuit portion is designed in the Zynq's fpga and the software portion is c-coded in the Zynq's processors by using the baremetal multiprocessing scheme in which the c-codes are distributed to dual-core processors, cpu0 and cpu1. To verify the usefulness of the proposed system, experiments were performed and the results were analyzed, and it was confirmed that the moving object could be tracked with accuracy of sub-cm.

Key Words : Positions tracking, Trilateration, Ultrasonic TOF, Pulse debounce, Kalman filter, Vivado, Zynq SoC, Baremetal multiprocessing

1. 서 론

이동체(mobile object)의 위치 추적을 위해 GPS, 레이저, 적외선 비콘, 카메라, RFID 및 초음파 등이 사용된다. 이들 중에서, 수 미터 이내 실내공간에서 위치추적을 목표로 하는 경우 전파속도가 가장 느린 초음파를 사용하면 높은 정밀도를 얻을 수 있다.[1] cm 수준의 위치 정확도를 얻을 수 있는 초음파 장치로는 Bat Ultrasonic Location 시스템[2], MIT Cricket 시스템[3], Randell과 Muller의 Location 시스템[4], Constellation 시스템[5] 등이 있는데, 이동체의 초음파송수신 여부에 따라 능동형(active)과 수동형(passive) 구조로 분류된다. Bat 시스템은 이동체가 송신노드가 되어 수신노드인 앵커로 RF 신호와 초음파 신호를 전송하는 능동형 구조로, 이동체의 위치는 외부에 설치된 PC에 의해서 계산된다. MIT Cricket 실내 시스템은 이동체가 앵커로부터 RF 신호와 초음파 신호를 수신하는 수동형 구조로, 이동체에서 자신의 위치를 계산하지만 정확도를 높이기 위해 PC와 외부 인터페이스를 필요로 한다. 최초의 상용 작업보조 시스템인 Sarissa LPS(Local Positioning System)[6]는 작업자의 손목에 장갑형의 이동체를 장착하여 작업 중 손의 위치를 cm-이

내의 정도로 추적할 수 있는 능동형 시스템으로, 최종적인 손위치 계산을 위해 PC가 필요하다. 본 연구에서는 실내 이동체의 위치를 정밀하게 탐지하기 위한 초음파 위치추적 시스템을 제안한다. 제안하는 장치는 능동형 구조로, 초음파 송신기(이동체)와 수신기(앵커)로 구성된다. 3개의 서로 다른 위치에서 초음파의 이동시간(time-of-flight : TOF)들을 측정하고, 삼변측정법[7]을 통해 PC 없이 이동체의 좌표를 알아낸다. TOF를 측정하기 위한 초음파 송신 개시 시간을 알아내기 위해, 이동체로부터 앵커로 초음파와 함께 2.4GHz RF 동기 신호를 전파한다. 한편, 펄스-디바운스 모듈을 설계하여 TOF 측정시에 생기는 잡음을 손쉽게 제거하였다.

실시간 신호처리를 위해 Xilinx의 Zynq SoC인 Z-7010를 장착한 ZYBO 보드[8]를 사용하였고, Vivado IDE (integrated design environment)[9]를 이용하여 계층적 블록 다이어그램의 형태로 전체 신호처리 시스템을 설계하였다. 신호처리에 필요한 디지털 회로부는 Zynq의 fpga에 설계하고 프로그램 부분은 c로 코딩하여 Zynq의 프로세서에서 처리하여 hardware/software co-design을 구현했고, c-코드는 baremetal-멀티프로세싱 방식에 의해 듀얼-코어인 cpu0와 cpu1에 적절히 분산시켜 작성했다[10]. 시스템의 유용성을 확인하기 위해, 실험을 수행하고 결과를 분석하여 회전 궤적의 추적 정밀도가 1cm 미만임을 확인하였다.

* Corresponding Author : Dept. of Information Communication & Display Engineering, Sunmoon University, Korea.
E-mail : mhkang@sunmoon.ac.kr

Received : June 7, 2017; Accepted : July 11, 2017

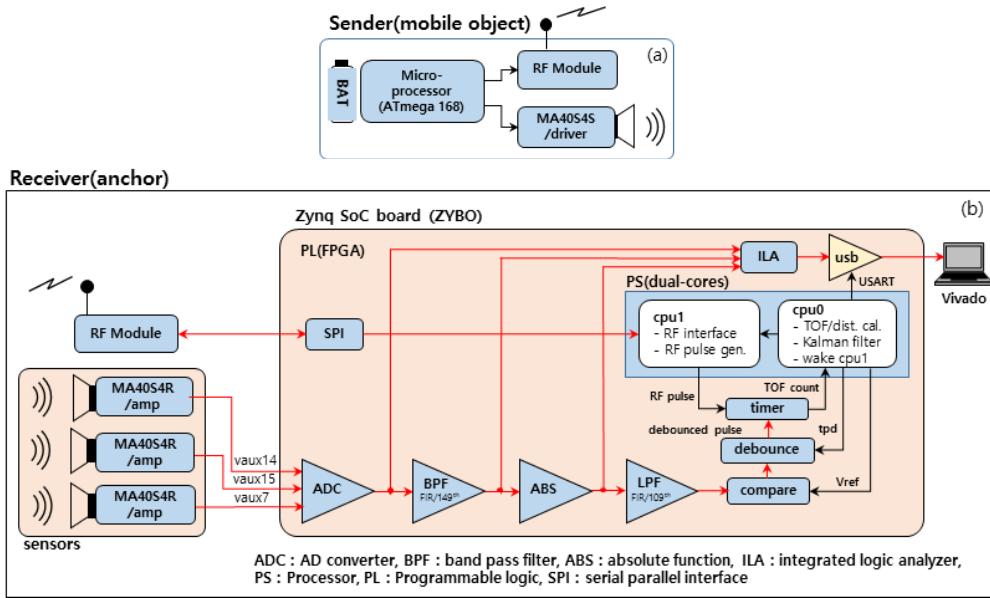


그림 1 초음파 위치 추적 시스템 구성 (a)초음파 송신기 (b)초음파 수신기

Fig. 1 Configuration of ultrasonic trajectory positioning system (a)ultrasonic sender (b)ultrasonic receiver

2. 초음파를 이용한 이동체 위치 추적

2.1 시스템 구성

본 연구에서 제안하는 이동체 추적 시스템은 그림 1과 같이 초음파 송신기(a)와 수신기(b)로 구성된다. 송신기는 초음파모듈/드라이버, RF(radio frequency) 모듈, 마이크로프로세서, 배터리 등으로 구성되어 이동체에 장착되고, 40 kHz의 초음파 신호와 2.4GHz RF 신호들을 주기적으로 수신기로 전송한다. 수신기는 RF 모듈, 3개의 초음파 센서/앰프, Zynq SoC 보드로 구성되어, 3개의 지점에서 ADC를 통해 초음파 신호를 수신한다. 이후, BPF (band pass filter), ABS(absolute value generator), LPF(low pass filter)를 차례로 거친 결과를 기준레벨(Vref)과 비교하여 초음파 펄스를 생성하고, 펄스-디바운스를 통해 펄스에 포함된 잡음을 제거하여 디바운스 펄스를 생성한다. 한편, 초음파 송신개시 시점을 알아내기 위해 RF 모듈을 통해 RF 신호를 받아 RF 펄스를 생성한 후, 타이머를 통해 디바운스 펄스와 RF 펄스 사이의 시간 차이를 계산하여 각 초음파 신호들에 대한 TOF(time of flight)들을 산출한다. 이러한 과정들은 Baremetal 멀티프로세싱에 의해 구현되어, Zynq의 cpu0는 TOF와 위치를 산출하고, cpu1은 RF 모듈 인터페이스를 통해 RF 펄스를 생성한다[10]. 그림 1에서 FPGA부 블럭들은 Vivado의 IP(Intellectual Property)[11]들을 이용하여 설계하였다.

2.2 위치 추적 방법

2.2.1 삼변측정(Trilateration)

그림 2는 삼변측정의 원리를 보인다.[7] s1, s2, s3는 각각 초

음파 센서의 위치이고, p(x,y,z)는 주기적으로 초음파를 발사하며 이동하는 이동체의 위치로 측정 목표치이다. 만약, c=b=a이고, 초음파 TOF로부터 각 센서와 이동체사이의 거리인 d1, d2, d3를 안다면, x, y, z는 식 (1)과 같이 구해진다.

$$x = \frac{d_1^2 - d_2^2 + a^2}{2a}, \quad y = \frac{d_2^2 - d_3^2 + a^2}{2a}, \quad z = \sqrt{d_1^2 - x^2 - y^2} \quad (1)$$

2.2.2 칼만 필터(Kalman Filter)

초음파는 온도, 바람, 진행을 방해하는 각종 장애물 등 다양한 요인들에 의해 공기 중에 전파할 때 항상 잡음이 유입된다. 본 연구에서는 초음파 이동거리인 d1, d2, d3와 x, y, z 계산에 각각 칼만 필터[12]를 적용하여 잡음의 영향을 제거한다. 식(2)-(4)는 식(1)의 x, y, z에 칼만 필터를 적용한 것으로, x, y, z는 측정위치, \hat{x} , \hat{y} , \hat{z} 는 추정위치, K는 칼만 이득, P, R, Q는 각각 에러, 측정 잡음, 프로세스 잡음에 대한 공분산을 나타낸다.

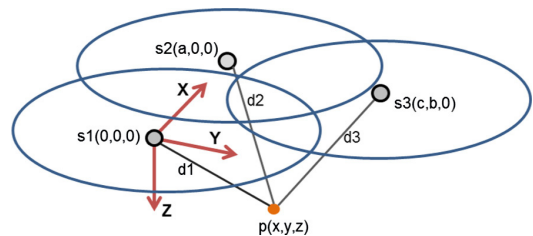


그림 2 삼변측정 원리

Fig. 2 Principle of trilateration

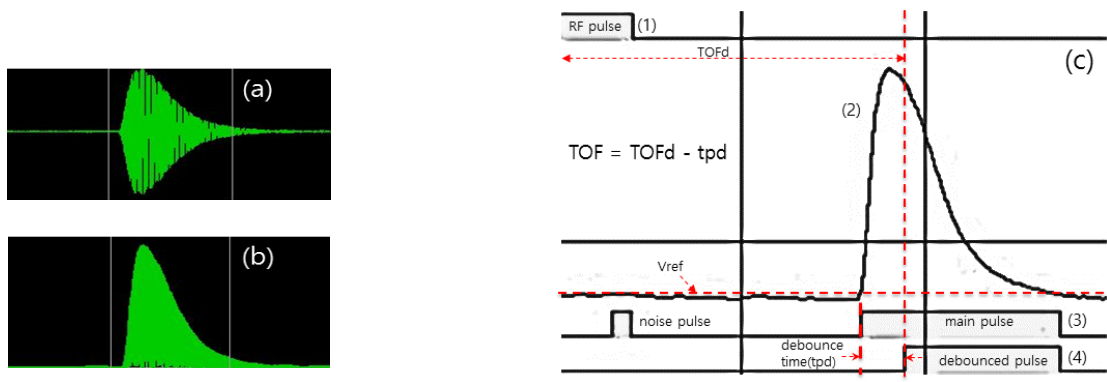


그림 3 잡음-펄스 디바운싱 절차와 그림 1의 각 부의 출력 (a) BPF 출력 (b) ABS 출력 (c) LPF 출력과 펄스 파형 ((1)RF 펄스 (2) LPF 출력 (3) 비교기 출력 펄스 (4) 디바운스 펄스)

Fig. 3 Noise-pulse debouncing and outputs of each system component of Fig. 1 (a) BPF output (b) ABS output (c) LPF output and pulses ((1)RF pulse (2)LPF output (3)comparator output pulses (4)debounced pulse)

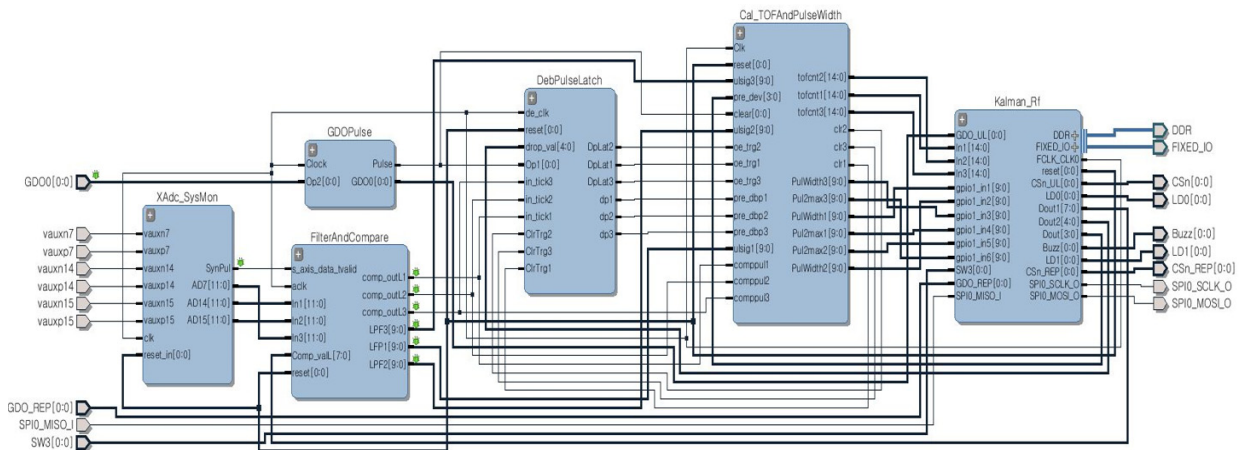


그림 4 초음파 신호 처리를 위한 FPGA 부 스키매틱

Fig. 4 FPGA part schematic for ultrasonic signal processing

$$K_n = P_n / (P_n + R) \quad (2)$$

$$\hat{x}_{n+1} = \hat{x}_n + K_n (x_n - \hat{x}_n),$$

$$\hat{y}_{n+1} = \hat{y}_n + K_n (y_n - \hat{y}_n),$$

$$\hat{z}_{n+1} = \hat{z}_n + K_n (z_n - \hat{z}_n) \quad (3)$$

$$P_{n+1} = (1 - K_n)P_n + Q \quad (4)$$

2.2.3 펄스 디바운스를 이용한 TOF 측정

식 (1)과 같이 삼변측정을 이용하기 위해서는 초음파 이동거리 (d)를 알아야 하는데, 초음파 TOF에 공기 중의 초음파 전파속도를 곱하여 구할 수 있다. 통상, TOF는, 수신측에서 감지한 초음파 신호로부터 포락선을 추출하고 레벨을 비교하여 생성한 초음파 펄스와, 초음파와 동시에 전파된 RF신호로부터 생성한 RF 펄스 사이의 전파 시간 차이를 통해 구한다. 하지만, 초음파가 수

신기로 전파되는 동안 여러 요인들에 의해 잡음이 발생하여, 단순히 레벨 비교를 행하면 초음파 펄스에 많은 잡음 펄스가 포함되고, 특히, TOF 정밀도를 높이기 위해 비교레벨을 낮추는 경우, 잡음 펄스가 크게 증가된다[13]. 본 연구에서는 비교레벨을 매우 낮추면서도 잡음 펄스를 효과적으로 제거할 수 있는 펄스 디바운스 (pulse debounce) 방법을 사용한다. 초음파 펄스의 폭을 실시간 계산하며 특정 폭(tpd)보다 작은 폭을 갖는 펄스를 제거하여, 메인 초음파 신호를 제외한 잡음을 쉽게 없앨 수 있다. 이때, tpd는 제거 대상 노이즈의 폭보다 크고, 메인 초음파 펄스의 폭보다는 작게 설정해야 한다. 그림 3은 펄스 디바운스 과정을 보인 것으로, 최종 TOF 값은 TOFd에서 tpd를 감산하여 구한다.

2.3 시스템 설계

그림 4는 Vivado IDE를 이용해 설계한 초음파 신호처리 전체

스키매틱을 보인다. 시스템에서 요구되는 각 기능을 구현하는 IP 블록들을 제작하고, 각 IP를 계층적으로 연결하여 전체 시스템 블록을 구성한다. 3개의 초음파 신호를 샘플링하고 (XAdc_SysMon), 필터링한 후 포락선을 검출하여 비교기에서 펄스를 생성하고 (FilterAndCompare), 잡음을 제거하기 위해 디바운싱한다 (DebPulseLatch). RF 펄스를 생성하여 (GDO Pulse), 디바운스 펄스와 RF 펄스 사이의 시간차이로부터 TOF를 계산한 후 (Cal_TOFAndPulse Width), 칼만 필터를 이용하여 필터링 한다 (Kalman_RF).

3. 시험 및 분석

3.1 시험장치 구성

이동체의 위치 추적 시험을 위해 그림 5와 같이 장치를 구성하고 시스템 파라미터들을 변경하며 시험을 행하였다. 초음파 송신기가 장착된 이동체는 약 20cm의 반지름으로 회전하며 초음파

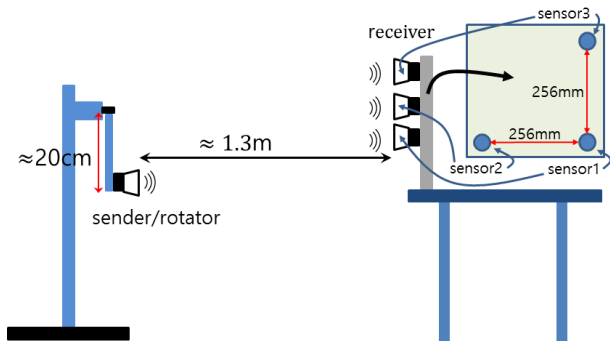


그림 5 초음파 송신기와 수신기 배치
Fig. 5 Arrangement of ultrasonic sender and receiver.

를 발생하고, 수신기는 송신기로부터 약 1.3m의 거리에서 초음파를 수신하며 이동체 위치를 추적한다. 그림 6은 초음파 송신장치와 수신기의 실제 모습을 보인다. 표 1은 초음파 송수신장치 각 요소들의 주요 사양들을 보인다.

표 1 초음파 장치 주요 사양

Table 1 Main specifications of ultrasonic devices

Sender	Ultrasonic transmitter	MA40S4S ($f_r = 40\text{kHz}, 10V_{pp}$)
	RF module	CC2500
	processor	Atmega 168
Receiver	Ultrasonic sensor	MA40S4R ($f_r = 40\text{kHz}$)
	RF module	CC2500
	Zynq (ZYBO)	XC7Z010 (ADC:16bit, $f_s = 1\text{MHz}$)

3.2 TOF 측정

그림 7은 초음파 송신기를 정지시킨 상태에서, 수신기를 초기 위치로부터 1cm씩 이동시키며 초음파 전파 거리를 계산한 결과이다. 초음파 센서들(s1, s2, s3)까지의 TOF들을 측정한 후, 식(5)의 초음파 속도를 곱하여 전파 거리를 계산하였다. 시험 결과, 수신기를 1cm 씩 이동시킬 때 마다 전파거리 계산결과도 동일한 양상으로 변하고, 7000개의 샘플 데이터에 대해 최대, 최소, 표준편차를 계산하여 정밀도가 1cm 이내임을 확인하였다.

$$v \approx 331.3 + 0.606 T \quad (5)$$

v : 공기 중의 초음파 속도(m/s), T : 공기 온도($^{\circ}\text{C}$)

3.3 원궤적 추적

그림 8은 초음파 송신기(이동체)를 회전시킨 상태에서, 초음파

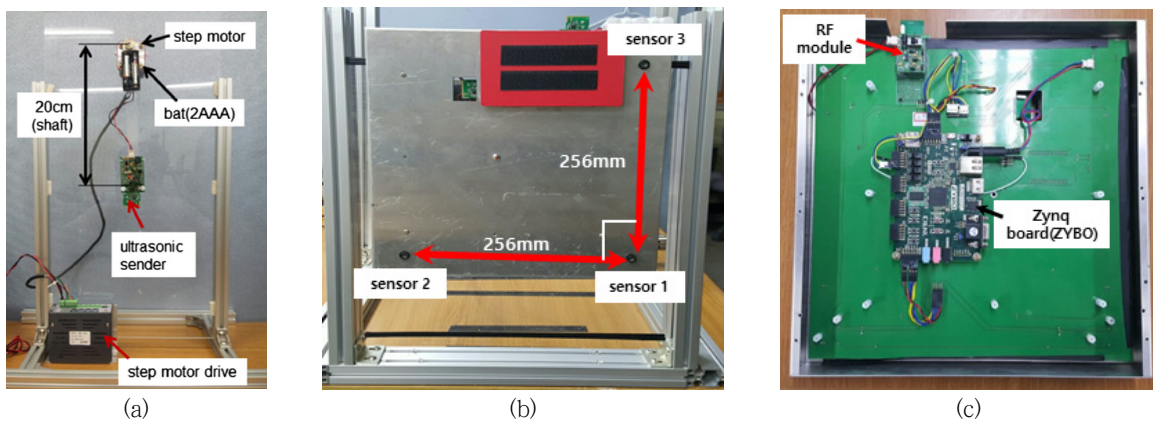
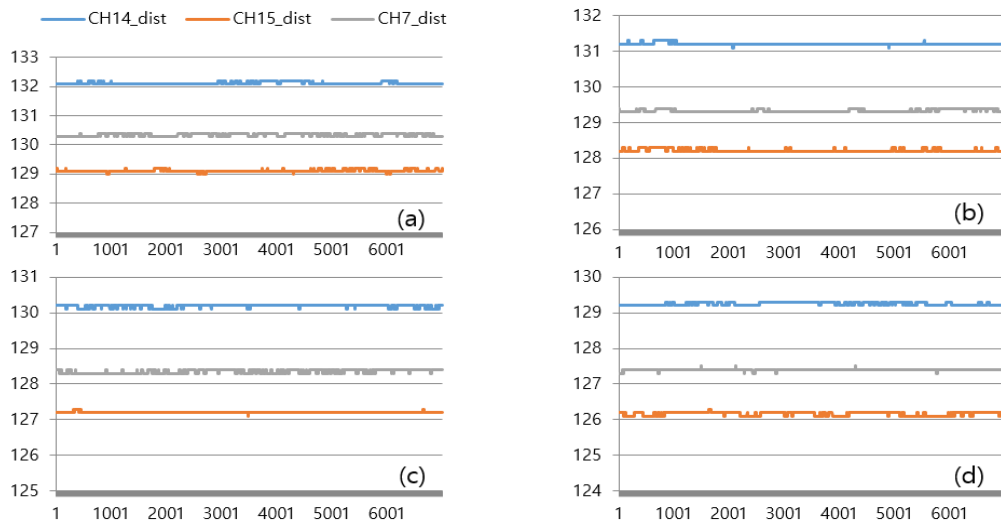


그림 6 초음파 송신기와 수신기 (a) 초음파 송신기와 회전 장치 (b) 초음파 수신기(전면) (c) 초음파 수신기(후면)
Fig. 6 Photos of ultrasonic sender and receiver. (a) ultrasonic sender and rotator (b) ultrasonic receiver(front) (c) ultrasonic receiver(back)



	(a) initial distance			(b) 1cm			(c) 2cm			(d) 3cm		
	CH14 (s1)	CH15 (s2)	CH7 (s3)	CH14 (s1)	CH15 (s2)	CH7 (s3)	CH14 (s1)	CH15 (s2)	CH7 (s3)	CH14 (s1)	CH15 (s2)	CH7 (s3)
Max	132.2	129.2	130.4	131.3	128.3	129.4	130.2	127.3	128.4	129.3	126.3	127.5
Min	132.1	129	130.3	131.1	128.2	129.3	130.1	127.1	128.3	129.2	126.1	127.3
STD	0.041	0.039	0.049	0.024	0.037	0.045	0.038	0.013	0.049	0.049	0.048	0.014

그림 7 그림 5에서 송신기와 수신기 사이의 거리를 1cm 씩 변동시킨 경우, 초음파 이동거리 측정 결과 (a)초기 거리 (b)1cm 변동 (c) 2cm 변동 (d)3cm 변동 (x: 샘플, y: 이동거리[cm])

Fig. 7 Ultrasound travelling distances with the arrangement of Fig. 5, according to 1cm distance variance between sender and receiver (a)initial distance (b)1cm variance (c)2cm variance (d)3cm variance (x:samples, y:distance[cm])

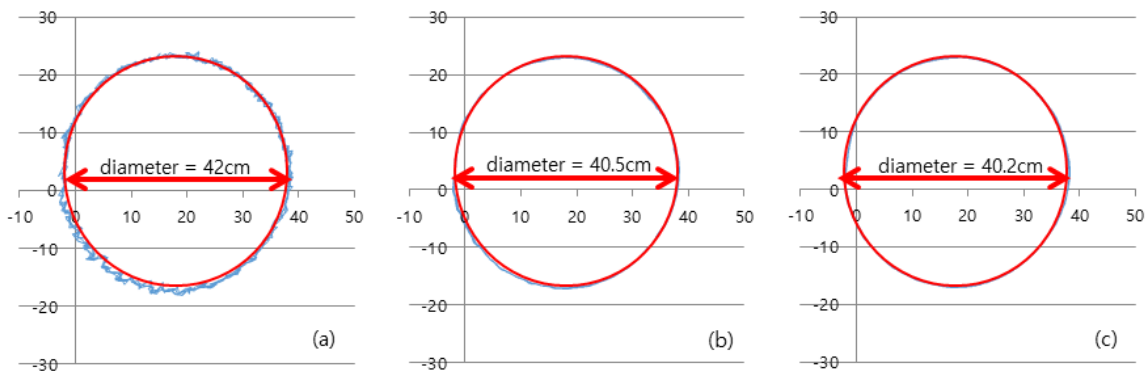


그림 8 그림 5에서 회전하는 초음파 송신기의 궤적 검지 결과 (붉은색: 기준궤적(지름 40cm), 파란색: 검지궤적) (a)칼만 필터 사용하지 않음 (b)칼만 필터로 측정거리만 필터링 (c)칼만 필터로 측정 거리와 위치 필터링 (Vref:10mV, 샘플주기:16.3ms, 샘플 수:7000, 칼만 필터 파라미터:R=400, Q=1, P=1) (x, y: [cm])

Fig. 8 Trajectory positioning results for the rotating ultrasonic sender with the arrangement of Fig. 5 (red: reference trajectory (diameter 40cm), blue: detected trajectory) (a)no Kalman filters (b)only distance Kalman filtering (c)with both distance and position Kalman filtering. (Vref:10mV, data sample period:16.3ms, sample number:7000, Kalman filter parameters:R=400, Q=1, P=1) (x, y: [cm])

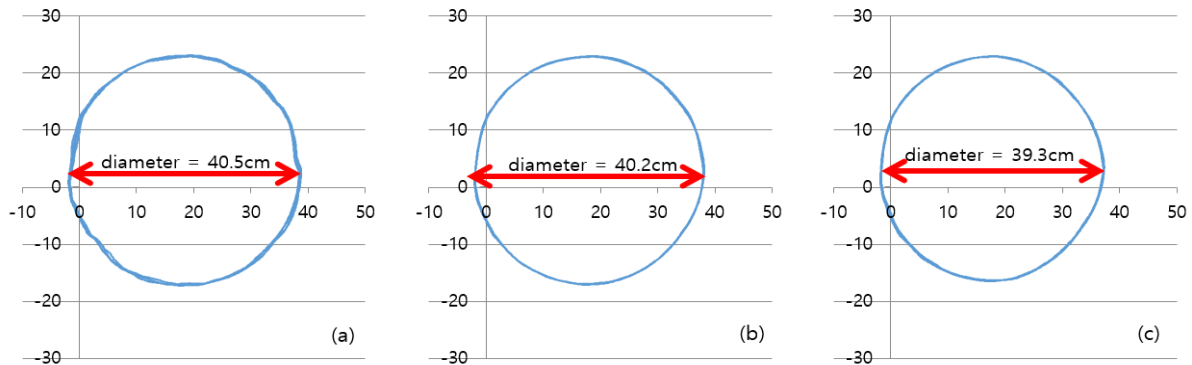


그림 9 그림 5에서, 비교기 기준전압 변동에 따른 초음파 송신기의 회전 궤적 검지 결과 (a) Vref=2mV (b) Vref=10mV (c) Vref=20mV. (샘플주기:16.3ms, 샘플수:7000, 칼만 필터 파라미터:R=400, Q=1, P=1) (x, y: [cm])

Fig. 9 Trajectory positioning results for the rotating ultrasonic sender with the arrangement of Fig. 5, according to various comparator reference voltages (a)Vref=2mV (b)Vref=10mV (c)Vref=20mV. (data sample period:16.3ms, sample number:7000, Kalman filter:R=400, Q=1, P=1) (x, y: [cm])

수신기에서 식 (1)에 따라 이동체 위치를 계산하여 x와 y 좌표를 도출한 결과이다. 그림에서 (a)는 칼만 필터를 적용하지 않고 계산한 경우, (b)는 초음파 이동거리 결과(d)에만 칼만 필터를 적용하여 계산한 경우, (c)는 이동거리와 위치 좌표(x, y, z)에 모두 칼만 필터를 적용한 경우를 보인다. 비교기 기준전압(Vref)은 10mV, 데이터 샘플 주기는 16.3ms, 샘플 개수는 7000개이고, 칼만 필터 파라미터는 R=400, Q=1, P=1이다. 시험 결과, 필터를 사용하지 않은 경우 궤적 전체에 걸쳐 큰 리플들이 발생하지만, 필터를 적용하고 적절한 파라미터를 선정하면 리플들의 크기가 모두 1cm 이내로 줄어드는 것을 확인하였다. 또한, 원 궤적의 지름도 약 40cm로 되어 궤적 추적이 잘 이루어지고 있음을 알 수 있다.

그림 9는 Vref를 변동시키며 이동체 궤적을 추적하여 x와 y 좌표를 도출한 결과이다. 데이터 샘플 주기는 16.3ms, 샘플 개수는 7000개이고, 칼만 필터 파라미터는 R=400, Q=1, P=1로 설정했다. Vref가 증가함에 따라 전체적으로 원궤적이 더욱 매끄럽게 되지만, 궤적의 지름은 작아지는 것을 확인할 수 있다. 비교레벨이 증가할수록 TOF가 실제보다 크게 계산되어 오차가 증가하고, 반대로 비교레벨을 낮추면 오차는 줄지만 잡음의 유입이 증가되어 원궤적의 리플도 증가한다. 실험결과, 비교레벨이 10mV(b)인 경우에 궤적을 가장 잘 추적하고 있다고 판단된다.

4. 결 론

본 연구는 실내에서 이동하는 물체의 위치를 알아내기 위한 초음파 위치추적 시스템에 관한 것이다. 제안된 시스템은 초음파 송신기(이동체)와 수신기(앵커)로 구성되어, 3개의 서로 다른 위치에서 초음파 TOF들을 측정하고 삼변측정법을 통해 실시간으로 이동체의 위치를 알아낸다. Zynq SoC를 이용하여 완전 디지털방식으로 초음파 신호처리를 수행하여 고성능 초음파 위치 추적 시

스템을 구현하였다. 설계 툴로는 Vivado IDE를 이용하여, 블록 다이어그램의 형태로 전체 시스템을 설계하였다. 신호처리에 필요한 디지털 회로부는 Zynq의 fpga에 설계하고 프로그램 부분은 c로 코딩하여 Zynq의 프로세서에서 처리하도록 하여 hardware/software co-design을 구현했고, c-코드는 baremetal-멀티프로세싱 방식에 의해 듀얼-코어인 cpu0와 cpu1에 적절히 분산시켜 작성했다. 제안된 시스템의 유용성을 확인하기 위해, 다양한 실험을 수행하고 결과를 분석하여 위치추적 정밀도가 1cm 이내임을 확인하였다.

감사의 글

이 연구는 2015년도 선문대학교 교내학술연구비 지원에 의하여 이루어졌음

References

- [1] J. Broadbent and P. Marti, "Location aware mobile interactive guides : Usability issues", Proc. 4th ICHIM, pp. 162-172, 1997.
- [2] A. Ward, A. Jones, A. Hopper, "A new location technique for the active office", Personal Communications IEEE vol. 4, no. 5, pp. 42 - 47, 1997.
- [3] N. B. Priyantha, A. Chakraborty, H. Balakrishnan, "The cricket locationsupport system", Proc. of the 6th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking, ser. MobiCom'00, ACM, New York, NY, USA, pp. 32-3, 2000.

- [4] C. Randell, H.L. Muller, "Low cost indoor positioning system", Proc. of the 3rd International Conference on Ubiquitous Computing, ser. UbiComp'01, Springer-Verlag, pp. 42-8, 2001.
- [5] E. Foxlin, M. Harrington, G. Pfeifer, "Constellation : a wide-range wireless motion-tracking system for augmented reality and virtual set applications", Proc. of the 25th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques, ser. SIGGRAPH'98, ACM, New York, NY, USA, pp.371-78, 1998.
- [6] Sarissa, Worker Assistance Systems, <www.sarissa.de> 2012.
- [7] A. Sanchez, A. de Castro, S. Elvira, G. Glezde-Rivera, J. Garrido, "Autonomous indoor ultrasonic positioning system based on a low-cost conditioning circuit", Measurement no. 45 pp. 276-283 2012.
- [8] ZYBO reference manual, digilent, Feb. 2014.
- [9] Vivado design suite user guide, programming and debugging, Xilinx, Apr. 2014.
- [10] B. G. Lim and M. H. Kang, "HW/SW co-design for an ultrasonic signal processing system using Zynq SoC," Journal of The Institute of Electronics Engineers of Korea, Vol. 51, no. 8, pp. 148-155, August 2014.
- [11] Vivado Design Suite User Guide, Designing with IP, Xilinx, May 1, 2014.
- [12] F. Ramsey, "Understanding the Basis of the Kalman Filter Via a Simple and Intuitive Derivation", IEEE SIGNAL PROCESSING MAGAZINE, pp. 128-132, SEPTEMBER 2012.
- [13] J. C. Jackson, R. Summan, S. M. Whiteley, S. G. Pierce, G. Hayward, "Time-of-flight measurement techniques for airborne ultrasonic ranging", IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control, vol. 60, no. 2, pp. 343-355, 2013.

저 자 소 개



강 문 호 (Kang Moon-Ho)

1990년 고려대학교 전기공학과 석사 졸업.
1995년 고려대학교 전기공학과 박사 졸업.
현재, 선문대학교 정보통신 디스플레이 공학과 교수. <관심분야> 모바일 및 임베디드 시스템