

오픈소스하드웨어를 이용한 침상머리각도 측정 시스템의 래피드 프로토타이핑

Rapid Prototyping of Head-of-Bed Angle Measurement System using Open-Source Hardware

조 봉 언, 박 영 상, 서 숙 길, 김 진 겐, 이 영 삼*
(Bong-Un Jo¹, Yeong-Sang Park¹, Sugkil Seo¹, Jin-Geol Kim¹, and Young-Sam Lee^{1,*})

¹Department of Electrical Engineering, Inha University

Abstract: When the study on the relationship between the Head-of-Bed (HOB) angle and ventilator-associated pneumonia is performed, the fact that the HOB angle can only be measured intermittently imposes a significant limitation on the study. Therefore, there has been demand for the development of a device that can measure the HOB angle continuously. In this paper, we propose the rapid prototyping of an HOB measurement system using open-source hardware and software. The proposed system helps to maintain the HOB angle at a particular angle by displaying the angle and helps the medical study of pneumonia patients by enabling continuous data acquisition. Firstly, we eliminate the process of making an MCU board by utilizing an open-source hardware mbed LPC1768. Secondly, we reduce the software development time by using libraries and hence enabling the easy use of peripherals. Thirdly, for rapid prototyping, we build the enclosure of the proposed system using a 3D printer. The proposed system can be attached and detached to and from a bed. Therefore, we can attach it to the bed of a patient for whom measurement of the HOB angle is necessary. Finally, we check the measurement performance and the validity of the proposed system through an experiment utilizing an incremental encoder.

Keywords: mbed, LPC1768, open-source hardware, rapid prototyping, head of bed

1. 서론

중환자실에서의 병원감염은 환자의 사망률을 증가시키고 동시에 병원 체류기간을 연장시키는 중요한 원인이다. 병원 감염중 하나인 폐렴은 기계호흡을 하는 경우 발생률이 6-20 배 증가한다[1]. 미국의 질병통제예방센터(Centers for Disease Control and Prevention)에서는 환자가 기계적 환기 보조를 받거나 비위관 튜브가 삽입되어 있는 경우 침상머리 각도를 30-45°의 각도로 유지시키도록 권장한다[2]. 내과 중환자실 환자의 침상머리 각도가 환자에 미치는 영향을 조사할 때 침상머리 각도는 침상 프레임을 기준으로 각도기를 이용하여 직접 측정한다. 24시간 연속적인 측정이 아닌 간헐적인 침상머리 각도의 측정은 이 연구의 제한점 중 하나이다[3].

침상머리각도란 침상위에서 환자의 머리에서부터 허리까지 취해지는 각도로 그림 1의 θ 와 같다. 이는 침대의 프레임을 기준으로 측정한 값이다.



그림 1. 침상머리각도에 대한 설명.

Fig. 1. Description of the Head of Bed angle.

환자들의 재활정도를 판단하고 재활에 도움을 주는 여러 시스템에 대한 연구가 있다. 중증뇌졸중환자의 팔목 움직임에 대한 재활을 돕는 센서의 개발[4], 후천적 사고로 인하여 손가락 마비의 재활의 정도를 측정하는 손가락 힘 측정 시스템[5] 그리고 편측시각무시 증상의 검사와 환자의 재활을 돕는 전자펜에 대한 연구가 있다[6]. 내과 중환자의 재활을 돕기 위한 사례로 해외의 연구에서는 침대에 포함된 모니터링 시스템을 사용한다[7]. 국내의 경우 탈부착형태의 침상머리 각도 모니터링 장치에 대한 연구가 있다[8]. 본 논문에서는 내과 중환자의 재활에 대한 연구를 돕기 위하여, 래피드 프로토타이핑 개념과 오픈소스하드웨어를 이용한 기존 시스템의 단점을 개선한 침상머리각도 측정 시스템을 제안한다.

오픈소스하드웨어는 하드웨어 제작에 필요한 회로도, 인쇄회로 기판 도면 및 관련서류 등을 공개함으로써 누구나 이를 활용한 제작물을 개발할 수 있도록 지원하는 하드웨

* Corresponding Author

Manuscript received October 2, 2015 / revised October 12, 2015 / accepted October 14, 2015

조봉언, 박영상, 서숙길, 김진겐, 이영삼: 인하대학교 전기공학과
(jbw4219@naver.com/pys0728k@hotmail.co.kr/smooms121@nate.com/john@inha.ac.kr/lys@inha.ac.kr)

※ 본 연구는 미래창조과학부 및 정보통신기술진흥센터의 융합 ICT고급인력과정지원사업의 연구결과로 수행되었음(IITP-2015-H8601-15-1003).

어를 뜻한다. 개발에 필요한 리소스가 공개되어 있고 제어 나 조작에 필요한 소프트웨어 또한 주로 오픈소스 형태로 공개되어있다. 최근 오픈소스하드웨어를 이용한 시스템의 개발이 늘어나고 있다. 오픈소스하드웨어의 대표적인 사례인 arduino를 이용한 데이터 수집시스템은 각종 센서를 이용하여 얻은 데이터를 RTC (Real Time Clock)의 시간 정보와 함께 SD카드에 저장한다[9]. 또한 생체역학분야에서 시험관 안의 림프액 시스템에 대한 연구를 위한 장치도 개발되었다[10]. 다른 오픈소스하드웨어인 mbed를 이용한 데이터 수집시스템도 개발되어 사용 중이다[11]. 언급한 장치들은 같은 기능을 하는 기존장치의 개발에 비하여 쉬운 접근 방법과 적은 비용을 장점으로 가진다.

제안된 시스템은 침상머리각도의 측정이 필요한 환자의 침상에 사용할 수 있도록 탈부착이 가능한 형태로 만든다. 침대에 부착해 각도를 측정하는 센서부분과 측정된 각도를 표시해주고 UI를 이용하여 설정하는 메인보드를 나누어 사용자가 원하는 곳에 놓고 사용할 수 있도록 한다. 측정된 데이터는 SD카드에 저장되어 쉽게 활용할 수 있다.

본 논문은 다음과 같은 구성을 가진다. 먼저 II 장에서 기존시스템의 설명과 제안된 시스템의 개선점을 나타낸다. III 장에서는 오픈소스하드웨어를 이용한 시스템에 설계에 관한 설명을 하고 개발된 시스템의 측정성능을 검사하여 실제 사용할 수 있을지 확인한다. 마지막으로 IV 장에서 결론을 제시한다.

II. 관련 연구

관련된 연구로 범용형 침상 머리 각도 모니터링 시스템이 있다[3]. 탈부착이 가능한 이 시스템은 Main Board와 Controller Board로 이루어져있다. Main Board는 침상에 붙어 각도를 측정하고 기록한다. 또한 저장된 데이터를 PC의 콘솔프로그램을 이용하여 문서화한다. Controller Board는 각도와 상태를 표시한다. 이와 같은 시스템을 구성하기 위한 소자들은 표 1과 같다.

각각의 소자들은 다음과 같은 성능을 가진다. Atmega128은 16Mhz로 동작하는 8bit microcontroller이다. 내부에 4Kbyte의 EEPROM이 있어 데이터를 저장할 수 있다. 53개의 I/O포트를 가지고 있으며 주변장치로 8bit와 16bit 타이머/카운터, ADC, I2C, SPI, USART가 있다.

AHRS (Attitude Heading Reference System)인 EBIMU-9DOF는 32bit RISC MCU와 3축 자이로센서, 3축 가속도센서, 3축 자기력센서가 융합된 센서이다. USART통신을 이용하여 Pitch/Roll/Yaw값 혹은 Quaternion값을 받을 수 있다.

M95512는 64Kbyte의 EEPROM으로 SPI통신을 이용하여

표 1. 기존 시스템에서 사용한 소자.

Table 1. Components of the existing system.

항목	소자
MCU	Atmega128
AHRS	EBIMU-9DOF
EEPROM	M95512
RTC	DS12C887

데이터를 저장하거나 불러올 수 있다. RTC는 I/O포트를 이용하여 현재의 시간을 알려준다.

기존의 시스템은 1분 간격으로 필터링된 침상머리각도를 저장한다. 하나의 데이터는 1 Byte로 하루의 데이터를 저장하기 위해서 1440 Byte가 필요하다. Main Board에 포함된 EEPROM은 64K Byte로 약 한달 정도의 데이터를 저장할 수 있다. RTC에서 얻은 시간은 Atmega128의 내부 메모리를 이용하여 저장된다. 데이터를 측정하고 저장하는 데이터 수신모드와 PC와 통신하여 데이터를 문서화하는 데이터 송신모드가 존재한다.

언급된 시스템은 일반적인 설계방법으로 설계되었다. 해당 하드웨어에 대한 충분한 지식, 센서와 같은 주변장치들의 동작에 대한 지식이 필요하다. 또한 프로그램을 다운로드 하기 위하여 별도로 JTAG 혹은 ISP가 필요하다.

본 논문에서 제안하는 시스템은 오픈소스하드웨어를 이용하여 동일한 기능의 시스템을 더 빠르고 쉽게 설계 가능하며, 많은 양의 데이터를 저장하고 손쉽게 이용할 수 있다.

III. 제안된 침상머리 각도 측정 시스템

제안된 침상머리 각도 측정 시스템은 그림 2와 같이 구성된다. (a)는 메인보드로 측정된 침상머리 각도를 SD카드(d)에 저장하고 디스플레이장치를 통하여 나타내어 준다. UI가 구성되어 있어 시스템의 여러 가지 설정을 변경할 수 있다. (b)는 센서보드로 침상에 붙어 침상머리각도를 측정한다. 메인보드와 센서보드는 플랫케이블(c)로 연결한다.

1. 하드웨어 구성

그림 3은 케이스를 제거한 메인보드와 센서보드이다. 메인보드에는 개발보드인 mbed LPC1768, 그래픽LCD인

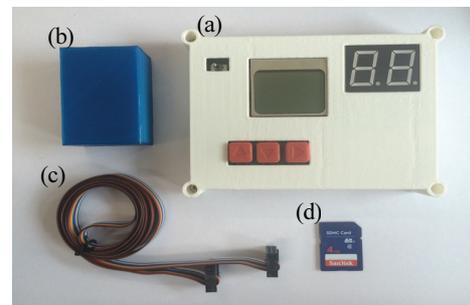


그림 2. 침상머리각도 측정 시스템의 구성.
Fig. 2. Composition of head of bed measurement system.

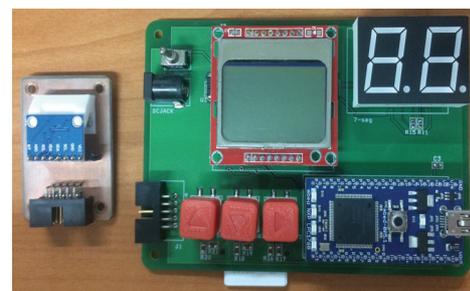


그림 3. 메인보드와 센서보드의 구성품.
Fig. 3. Components of the main board and the sensor board.

nokia5110, 스위치, 7-segment 그리고 SD카드로 구성된다. 센서보드에는 침상의 기울기를 측정하는 센서로 MPU6050이 사용된다.

mbed는 ARM의 32bit Cortex-M 시리즈를 기반으로 하는 개발 플랫폼이다. 많은 판매회사와 개발자가 mbed를 지원하여 래피드 프로토타이핑이 가능하다. 제안된 시스템은 NXP사의 LPC1768를 개발보드로 사용한다. LPC1768은 ARM Cortex-M3 core를 사용하고 96MHz로 동작한다. 내부 저장장치로 32KB RAM, 512KB Flash을 가지고 있다. 주변 장치로는 Ethernet, USB Host/Device, 2개의 SPI, 2개의 I2C, 3개의 UART, CAN, 6개의 PWM과 6개의 ADC가 있다.

오픈소스 하드웨어인 mbed는 다음과 같은 특징이 있다. 첫째, SDK (Software Development Kit)가 제공된다. C/C++을 기반으로 제공되는 SDK는 API-driven 방식의 코딩을 가능하게 한다. API가 무슨 동작을 하는지만 알면 코딩이 가능하다. 따라서 하드웨어에 대한 깊은 지식이 없어도 복잡한 프로그램을 코딩할 수 있다. 오픈소스 라이선스인 Apache 2.0에 의하여 개인적 혹은 상업적으로 이용할 수 있다. 둘째, HDK (Hardware Development Kit)가 제공된다. 하드웨어 회로도도 공개되어 사용자의 필요에 의해 수정이 용이하다. 특히 mbed LPC1768은 CMSIS-DAP (Cortex Microcontroller Software Interface Standard-Coresight Debug Access Port) 인터페이스가 포함되어 있어 Drag-and-Drop 프로그래밍, CMSIS-DAP 디버거 그리고 가상 시리얼포트로 동작이 가능하다. 셋째, 개발자 커뮤니티와 온라인 컴파일러가 있다. 개발자 커뮤니티란 mbed에 대한 기본적인 지식과 여러 라이브러리를 얻을 수 있는 곳으로 기존라이브러리의 오류나 알고리즘 개선과 같은 새로운 정보나 mbed에 관한 질문과 답변을 논의 하는 공간이다. 다음의 주소 '<https://developer.mbed.org/>' 통하여 개발자 커뮤니티에 접속할 수 있다. 온라인 컴파일러는 Windows, Mac, Linux 등 여러 가지 OS에서 동작한다. 인터넷이 가능한 곳 어디에서든 접속하여 프로그램을 작성하고 컴파일할 수 있다. Keil, IAR과 같은 오프라인 툴 체인에서 사용할 수 있도록 내보내기가 가능하여 온라인 컴파일러에 접속할 수 없는 상황에서도 개발을 가능하게 한다. 이와 같은 특징으로 ARM 마이크로컨트롤러를 기반으로 하는 래피드 프로토타이핑이 가능하다.

MPU6050은 3축 자이로센서와 3축 가속도계 그리고 DMP (Digital Motion processor)가 한 칩에 통합된 센서이다. 자이로 센서는 각도를 적분해서 얻기 때문에 실제 움직임과 비슷한 값을 가지지만 누적오차가 있고 가속도 센서는 진동과 외력에 값이 왜곡되지만 누적오차에 강한 성질을 가지고 있다. MPU6050의 DMP를 이용하면 사용자는 I2C 통신을 이용하여 두 센서가 융합된 값을 사용할 수 있다. mbed의 개발자 커뮤니티의 라이브러리를 사용하고 적절한 핀 배치를 통하여 MPU6050의 DMP를 이용하여 얻은 Pitch/Roll/Yaw값을 쉽게 받아볼 수 있다.

SD카드를 사용하기 위해서는 FAT (File Allocation Table) 파일시스템에 대하여 알아야 한다. 어떠한 구조로 이루어져 있고 각 구조가하는 역할을 이해하고 응용하기 위해서는 많은 시간이 걸린다. 마찬가지로 SD카드를 위한 라이브러

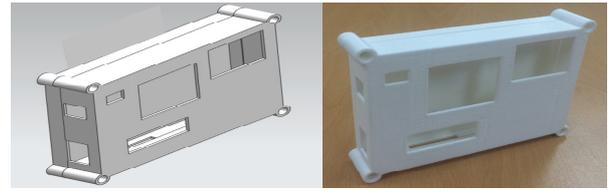


그림 4. (a) 3D 프린터로 인쇄하기 위한 케이스 모델, (b) 3D 프린터 결과물.

Fig. 4. (a) Enclosure model used for 3D printing, (b) 3D printed enclosure.

리를 사용하고 각각의 API가 어떠한 역할을 하는지만 알면 SD카드를 손쉽게 사용할 수 있다.

Nokia5110은 SPI통신을 이용하는 G-LCD이다. 18개에서 20개의 GPIO를 이용하는 다른 G-LCD를 이용하면 개발보드의 핀이 부족하다. 하지만 SPI통신을 이용하면 SD카드와 통신선을 공유하기 때문에 적은 핀으로도 두 개의 부품을 사용할 수 있다.

제안된 시스템의 센서보드는 침상에 부착시켜 각도를 측정하고 메인보드는 원하는 곳 어디든지 둘 수 있어야 한다. 이러한 자유로움과 래피드 프로토타이핑을 위해서 3D프린터를 이용하여 케이스를 제작하였다. 그림 4는 3D 설계 프로그램을 이용하여 설계한 3D 모델링과 3D 프린터를 이용하여 제작한 케이스이다.

2. 제안된 침상머리각도 측정 시스템 설계

그림 5는 제안된 시스템의 구조를 블록다이어그램으로 나타낸 것이다. 메인보드에서 Nokia5110과 SD카드는 SPI통신을 이용하여 동작하고 7-segment와 스위치는 GPIO핀으로 동작한다. 센서보드의 MPU6050은 I2C통신을 이용하여 메인보드와 연결된다.

제안된 침상머리각도 측정 시스템은 2개의 스프레드를 이용한다. 첫 번째 스프레드는 각도를 측정하고 저장하는 역할을 하고 두 번째 UI스프레드로 UI를 동작시켜 시스템의 설정을 변경한다. 그림 6은 첫 번째 스프레드의 순서도를 나타낸다. 전원이 인가되면 프로그램이 시작되고 초기화가 이루어진다. 5초에 한 번씩 각도를 임시저장하고 12번(1분)이 되었을 때 median필터를 이용하여 필터링을 한다. 그 후 SD카드가 꽂혀 있으면 SD카드에 저장하고 SD카드가 없으면 다시 각도를 측정한다. 두 번째 스프레드는 스위치의 눌림을 감지하고 있다가 스위치가 눌리면 현재 상태와 눌린 스위치의 관계를 비교하여 시스템의 설정을 변경한다. 그림 7은

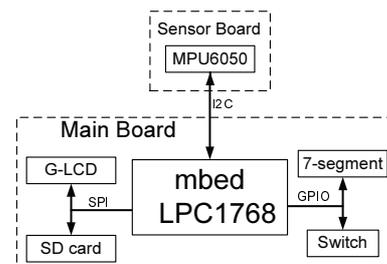


그림 5. 제안된 시스템의 블록다이어그램.

Fig. 5. Block diagram of the proposed system.

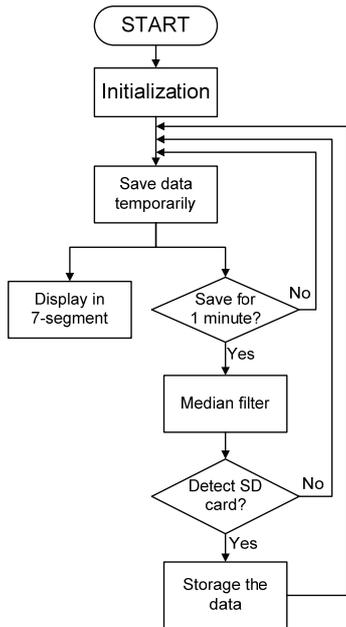


그림 6. 첫 번째 스레드의 순서도.

Fig. 6. Flow chart of the 1st thread.

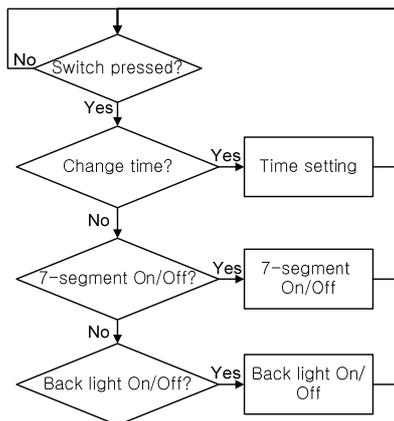


그림 7. 두 번째 스레드의 순서도.

Fig. 7. Flow chart of the 2nd thread.

UI를 이용하여 설정을 변경하는 방법을 나타낸다.

Median필터는 중간값 필터로 여러 데이터를 크기순으로 배열하여 그중 가운데 값을 사용한다. 주로 이미지나 기타 신호의 잡음을 제거하는 역할을 한다. Median필터를 이용하면 침상에 가해지는 작은 충격이나 센서를 건드려 발생하는 잡음을 제거할 수 있다.

데이터는 텍스트파일 형태로 저장된다. SD카드에는 해당 년도에 월단위로 텍스트파일이 저장된다. 예를 들면 'I:\2015\August.txt'와 같다. 텍스트파일 안에는 '각도, 일, 시간'의 형태로 데이터가 차례대로 저장된다. 데이터 처리나 보관의 용이성과 큰 용량의 텍스트파일은 에디터가 처리하지 못하는 상황이 발생할 수 있어 한 달 간격으로 나눠 데이터를 저장한다. 그림 8은 SD카드의 데이터를 엑셀을 이용하여 그래프로 그린 것이다.

제안하는 시스템은 기존의 시스템과 비교하여 다음과 같

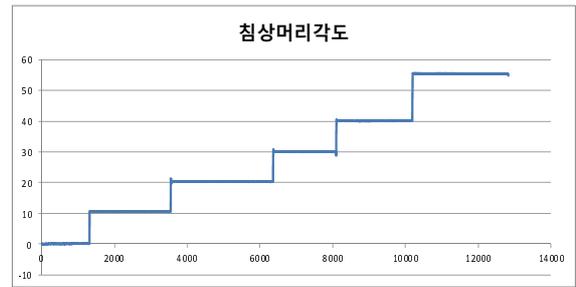


그림 8. 엑셀을 이용하여 그린 침상머리 각도 그래프.

Fig. 8. Graph on the HOB angle drawn using Excel.

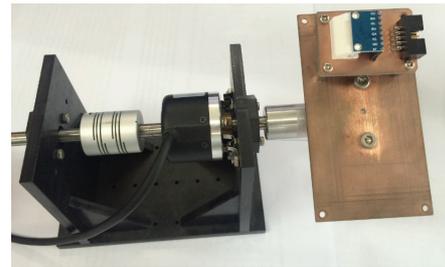


그림 9. 엔코더를 이용한 실험보조 장치.

Fig. 9. Experimental equipment using a rotary encoder.

은 개선사항이 있다. 첫째, 더 많은 데이터를 저장할 수 있다. 기존의 시스템의 저장 공간은 64KB로 1분에 한 번씩 데이터를 저장할 경우 약 44일간의 데이터를 저장 할 수 있다. 제안하는 시스템은 SD카드의 용량에 따라 최대 32GB까지 저장 할 수 있다. 실험에 사용한 SD카드는 4GB는 기존시스템의 80,000배인 3,500,000일을 저장할 수 있다. 둘째, 별도의 콘솔프로그램 없이 데이터를 사용할 수 있다. SD카드에 데이터가 저장되므로 SD카드 리더기를 이용하면 된다. 셋째, UI를 이용하여 시스템의 설정을 변경 할 수 있다. RTC에 의한 시간이 달라질 경우 UI를 이용하여 시간을 변경 할 수 있고, 디스플레이 장치의 설정이 가능하여 각도를 보지 않고 저장만 하도록 할 수 있다.

3. 제안된 시스템의 동작

그림 9와 같은 보조 장치를 이용하여 침상머리 측정 시스템의 동작을 시험해본다. 로터리 엔코더와 센서보드를 같은 축에 연결하여 각각의 측정값을 비교한다. 사용된 엔코더는 1000PPR의 분해능을 가져 4체배를 할 경우 0.09°까지 측정이 가능하다. 인크리멘탈 엔코더는 절대각이 아닌 상대적인 각에 의해 펄스가 생성되기 때문에 초기에 수평계를 이용하여 0°를 맞춘다.

일정한 각도에서 각각 1000~1500개의 데이터를 얻어 정상상태에서 오차를 확인하는 실험을 한다. 그림 10은 실험 결과를 그래프로 나타낸 값이다. 그림 10(b)는 제안된 시스템의 오차를 나타낸 것으로 시스템을 통하여 얻은 각도에서 엔코더를 이용하여 얻은 각도를 뺀 값이다. 각도를 바꿀 때 보조 장치를 직접 손으로 돌린 후 7-segment에 나온 각도를 보고 고정한다. 오차를 보면 각도를 바꾸는 경우에 크게 측정된다. 이는 MPU6050에서 lowpass필터를 사용하기 때문에 생긴 측정값의 지연이다. 표 2는 각각의 각도에서

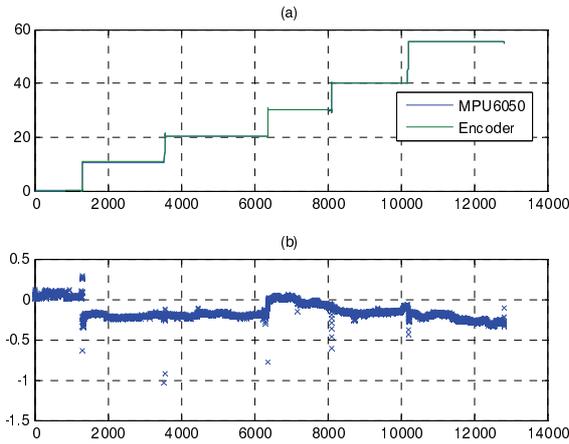


그림 10. (a) 정상상태 실험 결과, (b) 정상상태 오차.
 Fig. 10. (a) Result of a steady state experiment, (b) Steady state error.

표 2. 정상상태 실험 결과.

Table 2. Result of a steady state experiment.

각도	데이터수	평균오차	최대오차
0°	1300	0.089	0.089
10°	2200	0.211	0.210
20°	2800	0.210	0.213
30°	1700	0.008	0.010
40°	2100	0.059	0.075
55°	2500	0.100	0.125

얻은 값의 개수와 최대오차 그리고 평균오차를 나타낸다. 오차는 장치를 움직인 후 정상상태가 되었을 때 측정된 값을 이용하여 구한다.

그림 11은 80°에서 실험을 한 결과 이다. 이 경우 최대 오차는 0.931이고 오차의 평균은 1.076이다. 앞선 실험의 결과에 비해 큰 오차가 발생한다. 수직에 가까운 각도에 갈수록 오차가 커지는 경향이 보이고 실험을 하면서 보인 최대 오차는 1.5°이다.

실험 결과를 보면 센서의 lowpass필터 사용으로 인한 출력값의 지연과 수직에 가까워질 때 나타나는 큰 오차가 나타난다. 때문에 빠르게 움직이는 물체 혹은 수직에 가깝게 서있는 물체의 각도를 측정하기에 적절하지 않다. 하지만 제안된 시스템은 중환자의 침상머리각도를 측정하는데 사용되기 때문에 문제없이 사용 가능하다. 또한 데이터는 median필터를 거쳐 1분마다 저장되기 때문에 침상에 가해지는 충격이 나 환자의 뒤척임과 같은 짧은 시간 측정되는 잡음이 제거된다.

IV. 결론

본 논문에서는 오픈 소스하드웨어를 이용한 침상머리각도 측정 장치의 래피드 프로토타이핑을 제안하였다. 간헐적인 침상머리각도 측정은 기계호흡을 하는 중환자의 체위가 미치는 영향에 대한 연구에 제한점 중 하나이다. 제안된 시스템은 이러한 연구의 도움을 주는 보조 장치로 기존장치의 단점을 보완하여 설계되었다. 제안된 시스템의 특징은

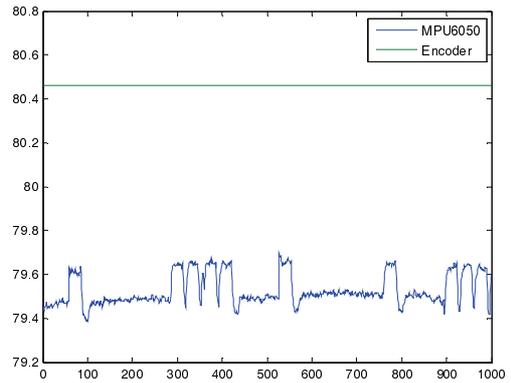


그림 11. 80°일 때의 실험 결과.
 Fig. 11. Experimental result with angle being 80°.

다음과 같다. 첫째, 기존의 시스템과 마찬가지로 탈부착이 가능하여 침상머리각도의 측정이 필요한 환자에게 선택적으로 사용할 수 있다. 둘째, 오픈소스하드웨어를 이용하여 더 빠르고 쉽게 설계하였다. mbed LPC1768을 사용하면 하드웨어의 깊은 지식이 없어도 복잡한 프로그램을 만들 수 있고 개발자 커뮤니티를 이용하면 다양한 장치에 대한 정보와 라이브러리를 이용할 수 있다. 셋째, SD카드를 이용하여 각도를 저장한다. SD카드를 이용하면 많은 양의 데이터를 저장 할 수 있고 손쉽게 이용 가능하다.

실험을 통한 시스템의 측정 성능을 평가한 결과 수직과 가까운 각도를 측정할 때 최대오차가 1.5°정도로 나타난다. 움직이는 각도를 측정할 때 센서에 내장된 lowpass필터로 인한 값의 지연이 있다. 하지만 제안된 시스템이 침상머리각도 측정이 필요한 중환자에게 사용되는 점과 1분에 한번 씩 median필터를 거쳐 저장되는 점으로 인하여 제안된 시스템을 실제로 사용하는데 문제가 되지 않는다.

REFERENCES

- [1] H. Pai, "Nosocomial infections in intensive care unit: epidemiology and control strategy," *Hanyang Medical Reviews*, vol. 31, no. 3, pp. 153-158, 2011.
- [2] O. C. Tablan, L. J. Anderson, R. C. Bridge, and R. Hajjeh, "Guidelines for preventing health-care-associated pneumonia," *MMWR Recommendations and Reports*, 53(RR-3), pp. 1-36, Mar. 2004.
- [3] S. Na, H. Lee, S. Koh, H. Lee, and S. Na, "Implementation of the head of bed (HOB) elevation protocol on clinical and nutritional outcomes in critically ill patients with mechanical ventilator support," *The Korean Journal of Critical Care Medicine*, vol. 23, no. 3, pp. 128-133, Sep. 2011.
- [4] T. Hong and G. Kim, "Design of a four-axis force/moment sensor for measuring the applied force to wrist," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems (in Korean)*, vol. 19, no. 11, pp. 1011-1016, Nov. 2013.
- [5] G. Kim, "Development of a hook-type finger force measuring system with force sensors," *Journal of*

Institute of Control, Robotics and Systems (in Korean), vol. 20, no. 6, pp. 663-668, Jun. 2014.

- [6] J. Kim, H. Jee, and J. Park, "Electronic pen-based unilateral visual neglect assessment and rehabilitation system," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems (in Korean)*, vol. 20, no. 6, pp. 647-650, Jun. 2014.
- [7] R. Wolken, R. Woodruff, J. Smith, R. Albert, and I. Douglas, "Observational study of head of bed elevation adherence using a continuous monitoring system in a medical intensive care unit," *Respiratory care*, vol. 57, no. 4, pp. 537-543, Apr. 2012.
- [8] G. Gyeong, Y. Lee, and Y. Lee, "Development of attachable HOB monitoring system with performance analysis," *Journal of Rehabilitation Welfare Engineering & Assistive Technology*, vol. 8, no. 3, Aug. 2014.
- [9] D. Fisher and P. Gould, "Open-source hardware is a low-cost alternative for scientific instrumentation and research," *Modern Instrumentation*, vol. 1, pp. 8-20, Apr. 2012.
- [10] J. Kornuta, M. Nipper, and J. Dixon, "Low-cost microcontroller platform for studying lymphatic biomechanics in vitro," *Journal of biomechanics*, vol. 46, no. 1, pp. 183-186, 2013.
- [11] M. Shankar and S. Muligar, "Development of user friendly data acquisition and actuation system on embedded platform," *International Journal of Innovative Research in Electrical, Electronics, Instrumentation and Control Engineering*, vol. 3, no. 1, Apr. 2015.



조 봉 언

2015년 인하대학교 전기공학부 졸업.
2015년~현재 인하대학교 대학원 전기공학과 석사과정 재학중. 관심분야는 임베디드 제어 시스템 설계.



박 영 상

2015년 인하대학교 전자공학과 졸업.
2015년~현재 인하대학교 대학원 전기공학과 석사과정 재학중. 관심분야는 경로 계획, 플랜트 제어, 시스템 소프트웨어.



서 속 길

2015년 인하대학교 기계공학부 졸업.
2015년~현재 인하대학교 대학원 전기공학과 석사과정 재학중. 관심분야는 디지털제어기 설계.

김 진 걸

제어 · 로봇 · 시스템학회 논문지, 제15권 제4호 참조.

이 영 삼

제어 · 로봇 · 시스템학회 논문지, 제15권 제4호 참조.