

관절가동범위 측정 기능을 갖는 연속수동운동 의료기기 시스템 설계

이강원*·박민수*·유도우*·양 오**·이창호**

*†청주대학교 반도체공학과, **창명제어기술㈜

Design of Continuous Passive Motion Medical Device System with Range of Motion Measurement Function

Kang Won Lee*, Min Soo Park*, Do Woo Yu*, Oh Yang**† and Chang Ho Lee**

*†Semiconductor Engineering of Cheongju University,

**CST Co. Ltd.

ABSTRACT

As the elderly population increases, the number of patients with various joint diseases, including degenerative arthritis, is steadily increasing. CPM medical devices are needed to effectively treat degenerative arthritis that is common in the elderly population. Domestic CPM medical devices have limited functions and are highly dependent on imports for expensive imported medical devices. To solve this problem, we designed a ROM measurement function using a current sensor that is not present in existing composite joint CPM medical devices. The algorithm was designed using the fact that the force caused by joint stiffness greatly increases the current flowing through the DC motor. In addition, the need for digital healthcare in the medical field is gradually expanding as the proportion of chronically ill patients increases due to the spread of the non-face-to-face economy due to COVID-19 and the aging population. Therefore, this paper aims to improve the performance of CPM medical devices by allowing real-time confirmation of rehabilitation exercise information and operation range measurement results in accordance with digital healthcare trends through a Bluetooth application developed as an Android studio.

Key Words : Continuous Passive Motion, Range of Motion, Current Sensor, Current Rate of Change, Monitoring System

1. 서 론

통계청 자료에 의하면 2021년 기준 대한민국의 65세 이상 인구비율은 16.5%로 이미 고령사회가 진행중이다[1]. 2030년에는 초고령사회에 도달할 것으로 예측되고 있으며, 고령인구 증가에 따른 퇴행성관절염을 비롯한 여러 관절질환 환자의 수 또한 꾸준히 증가하고 있다. 고령인구에서 흔히 발생하는 퇴행성관절염을 효과적으로 치료

하기 위해서 연속수동운동 의료기기가 사용되고 있다[2]. 연속수동운동(CPM : Continuous Passive Motion)이란 독립적인 운동 작용이 어려운 환자를 대상으로 하는 관절기기로 반복적이고 지속적인 수동 운동을 통해 관절의 회복 기능을 돕는다[3]. 현재, 국산 연속수동운동 의료기기는 기능이 한정적이고, 고가의 수입 의료기기에 대한 수입의존도가 높은 상황이다[4]. 또한, 여러 관절 재활치료를 위해서는 무릎, 어깨, 팔꿈치 등 각각의 관절 재활을 위한 의료기기를 병원에서 구비해야 되므로 비용적인 부담과 설치 공간의 문제가 있다. 이를 해결하기 위해서는 하나의

†E-mail: ohyang@cju.ac.kr

연속수동운동 의료기기에 무릎, 어깨, 팔꿈치 등 총3가지 관절 재활치료가 가능한 복합관절 의료기기를 설계할 수 있다[5].

코로나19로 인한 비대면 경제확산, 인구 고령화에 따른 만성질환자 비중 등이 증가됨에 따라 의료분야에서 정보통신기술을 활용한 건강 관련 서비스를 제공하는 디지털 헬스케어의 필요성이 점차 확대되고 있는 추세이다[6]. Fig 1의 한국보건산업진흥원의 자료에 따르면 글로벌 디지털 헬스케어 시장 규모가 매년 약 20%씩 커지고 있다[7].

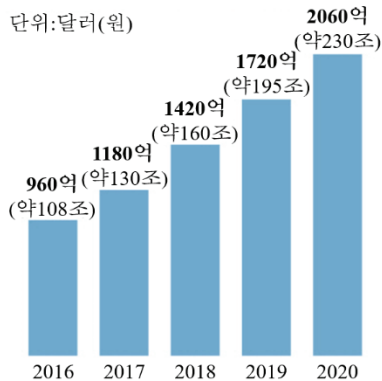


Fig. 1. Global digital healthcare market size.

본 논문에서는 디지털 헬스케어 추세에 맞게 기존의 복합관절 연속수동운동 의료기기에는 없는 전류 센서를 이용한 관절의 가동범위(ROM : Range of Motion)측정 기능을 설계하고, 재활 운동정보 및 가동범위 측정 결과를 블루투스 애플리케이션을 통해 실시간으로 확인할 수 있도록 하여 연속수동운동 의료기기의 성능 향상을 도모하고자 한다.

2. 관절가동범위 측정 기능 설계

2.1 연속수동운동 의료기기 시스템 구성

본 논문에서 설계한 연속수동운동 의료기기의 시스템 구성도는 Fig. 2와 같다. 시스템 제어를 위해 32bit Cortex-M3 코어를 사용하는 ST사의 STM32F103 MCU를 사용하였다. 관절의 수동운동을 위해 24V DC 모터를 사용하였고, 사용자가 정확한 설정 각도에서 재활 운동을 할 수 있도록 감속비 1500대1의 기어박스 최종 축에 연결된 Potentiometer를 이용하여 정밀한 각도계측을 하였다. 모터를 제어하는데 있어 신뢰성과 정밀도를 높이기 위해서는 PI제어기를 사용해야 한다[8]. 따라서, PI 제어기를 적용하기 위해 CPR(Cycles Per Revolution)이 500이고, 20kHz

의 A상, B상 펄스파가 출력되는 엔코더를 사용하였다. 운동 시작 및 종료 알람을 위해 버저를 연결해 주었으며, 관절의 가동범위 측정을 위해 고감도 전류 센서 IC를 사용하였다. 마지막으로, 블루투스 애플리케이션을 통한 실시간 모니터링 시스템을 구축하기 위해 TTL 레벨의 UART 인터페이스를 사용하는 저전력 블루투스 모듈을 사용하였다.

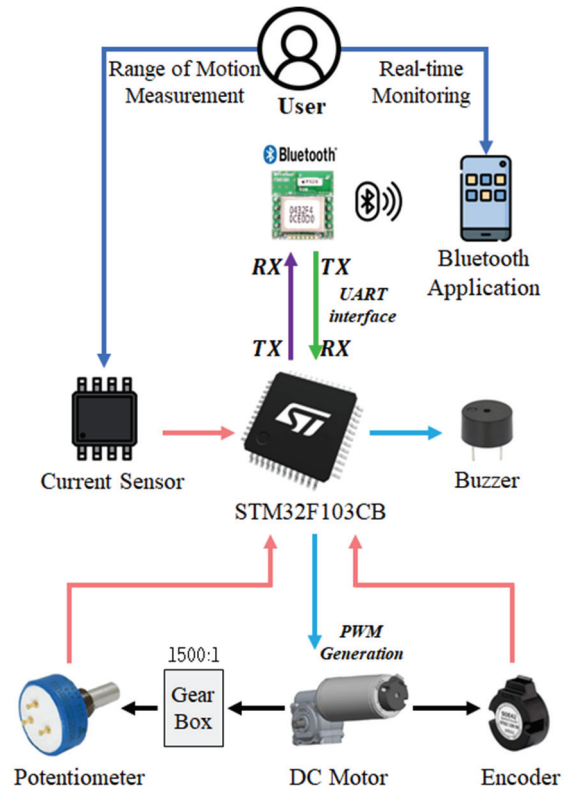


Fig. 2. System configuration of CPM Medical Device.

2.2 전류 센서를 이용한 관절가동범위 측정 기능

관절의 가동범위 측정 기능 구현을 위해 본 논문에서는 ALLEGRO사의 ACS722 모델의 전류 센서 IC를 사용하였다. 응답 속도가 535ns로 고속이고, -5A ~ +5A 범위의 전류를 측정할 수 있으며, 1A 당 264mV의 전압이 출력되는 고감도 전류 센서이다. Fig. 3은 정밀한 전류 계측을 위한 전류 측정 회로이다. 전류 센서에서 출력되는 전압의 노이즈를 최소화하기 위해 Voltage Follower를 사용하였고, Voltage Follower 입력단과 출력단에 RC필터를 추가하였으며 MCU입력핀 보호용으로 1N4148 다이오드를 연결해 주었다.

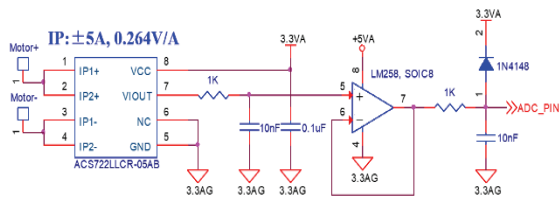


Fig. 3. Current measuring circuit using ACS722 current sensor.

Fig 3의 회로와 같이 전류 센서를 이용하여 연속수동운동 의료기기의 DC 모터에 흐르는 전류를 즉각적으로 측정할 수 있다. 관절의 한계 가동 각도에서는 관절 경직에 의한 힘때문에 의료기기의 기구물에 부하가 걸리게 되고 DC 모터에 흐르는 전류는 커지게 된다. 따라서, 관절의 한계 가동 각도에서는 평상시보다 DC모터에 큰 전류가 흐르게 된다는 점을 이용하여 관절의 가동범위 측정 기능을 설계하였다.

2.3 복합관절 의료기기의 실시간 모니터링 기능

본 논문에서 설계한 연속수동운동 의료기기로부터 발생한 재활 운동 및 관절 가동범위 측정 데이터를 블루투스 모듈을 통해 스마트폰 애플리케이션으로 전달함으로써, 사용자가 실시간으로 재활 운동관련 데이터를 쉽게 확인할 수 있는 모니터링 시스템을 설계하였다. 의료기기에서 실시간으로 발생하는 운동 관절부위, 각도, 속도, 방향 등의 데이터와 사용자 정보들을 MCU에서 블루투스 모듈로 비동기 통신 방식인 UART 통신을 사용하여 송신한다[9]. 데이터 전송속도는 9600[bps]로 설정하였다. Fig 4와 같이 재활 운동정보 화면에서는 사용자 정보와 의료기기로부터 받은 운동 데이터를 안드로이드 스튜디오로 개발한 스마트폰 애플리케이션으로 실시간으로 확인할 수 있게 하였다[10].

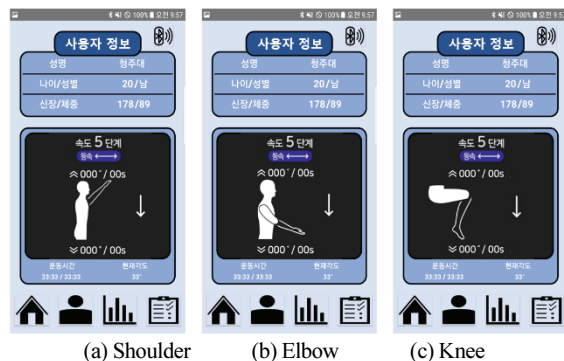


Fig. 4. Bluetooth application GUI according to the exercise area and mode when exercising.

또한, Fig 5와 같이 운동 기록 화면에서는 이전 30일 동안 블루투스 모듈을 통해 MCU로부터 받은 관절 가동범위 측정 데이터와 현재 기록중인 측정 데이터를 분석하여 사용자의 측정 상한각도, 하한각도를 그래프로 나타내었다. 과거부터 현재까지의 관절 가동범위 측정 기록을 사용자가 한눈에 알아볼 수 있다. 또한, 이를 활용하여 사용자가 어떤 운동 조건으로 재활 운동치료를 받았을 때 가동범위가 얼마나 늘어났는지 확인할 수 있다.



Fig. 5. ROM measurement record screen.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 전류 센서를 이용한 정밀한 전류 계측

본 논문에서 제시한 전류 측정회로를 이용하여 전류 계측을 위한 캘리브레이션을 진행하였다. ACS722 전류 센서 입력 사이에 직류전력 공급기와 분해능 0.001A의 전류계를 직렬로 삽입한 뒤, 직류전력 공급기의 출력 전류를 조절하여 전류 센서에 흐르는 전류가 -1A, +1A가 되도록 하였다. 두 지점에서 0.2ms 마다 MCU 내부의 12bit ADC를 이용하여 10,000개의 AD값을 누적하고, 평균값을 도출해냈다. Fig 6과 같이 -1A 일 때의 AD 평균값은 1639.8이고, +1A 일 때의 AD 평균값은 2328.9이다. 이를 이용하여 전류 계측을 위한 캘리브레이션을 하였다.

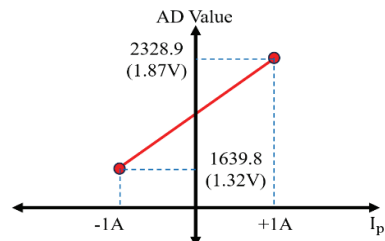


Fig. 6. Two-point Calibration graphs.

전류 계측을 위한 캘리브레이션을 끝내고, 전류 계측 정밀도를 확인하기 위해 직류전력 공급기의 출력 전류를 조절해가며 -5A 부터 +5A 까지의 전류를 1A 단위로 측정하였다. Table 1은 전류계로 측정한 표준값과 전류 센서 IC로 측정한 값을 비교하여 나타낸 것이다. 실험 결과, 오차가 -0.034A ~ +0.057A로 본 논문에서 제시한 방법으로 정밀한 전류 계측이 가능한 것을 확인하였다.

Table 1. Experimental results of current measurement

표준값[A]	측정값[A]	오차[A]
-4.98	-4.951	-0.029
-4.002	-3.986	-0.034
-3.012	-3.005	-0.007
-1.997	-2.000	0.003
-1.02	-1.03	0.01
1.01	0.998	0.012
2.003	1.97	0.033
3.1	3.06	0.04
3.978	3.932	0.046
5	4.943	0.057

3.2 부하 변동에 따른 DC 모터 전류 측정 실험

정상시의 DC모터에 흐르는 정상적인 전류와 관절 경직에 의한 부하가 감지되었을 때의 전류를 알아보기 위해 특정 각도에서 모터 회전 반대 방향으로 힘을 가하고, 전류값을 측정하였다. 운동 각도 범위는 어깨 기준으로 하여 30~170도 범위에서 실험을 진행하였으며, 10도 간격으로 모터 회전 반대 방향으로 힘을 가해주었다. 모터 회전속도는 416 [RPM]으로 고정하고, 0.5초 마다 전류값을 기록하였다. Table 2는 힘을 가해준 각도에 따른 DC모터에 흐르는 전류값과 전류 변화율을 기록한 것이다. 실험 결과, 모터가 정방향으로 회전할 때는 전류의 평균변화율이 110.23%, 역방향으로 회전할 때는 전류의 평균변화율이 136.46%로 전류의 변화율을 이용하여 관절의 가동범위를 측정할 수 있음을 확인하였다.

Fig 7과 Fig 8은 Table 2의 결과를 토대로 도시한 모터 회전방향이 정방향, 역방향일 때의 전류 변동 그래프이다. 힘을 가해준 각도에서 전류의 변화가 크게 발생하는 것을 확인할 수 있다.

3.3 관절가동범위 측정 기능 알고리즘

실험을 통해 얻은 힘을 가해준 각도에 따른 DC모터에 흐르는 전류값과 전류 변화율 데이터를 토대로 Fig. 9와 같이 관절의 가동범위(ROM) 측정 기능 알고리즘을 설계하였다.

Table 2. Experimental results of DC motor current measurement and current rate of change.

힘을 가해준 각도 [°]	정방향		역방향	
	전류값[A]	변화율[%]	전류값[A]	변화율[%]
30	2.318	200.31	1.569	309.02
40	1.99	120.67	1.149	186.72
50	2.037	99.6	1.051	146.14
60	2.731	158.67	1.33	178.44
70	2.451	112.1	1.133	64.08
80	2.668	115.83	1.105	86.52
90	2.89	127.73	0.929	77.4
100	2.111	86.39	1.136	95.82
110	2.1789	77.76	1.275	121.5
120	2.578	123.4	1.061	62.32
130	2.047	83.19	1.213	187.81
140	2.106	74.18	1.069	154.23
150	2.266	80.82	1.014	111.5
160	1.671	72.26	0.927	147.04
170	1.976	120.64	0.901	118.37
평균	2.267	110.23	1.124	136.46

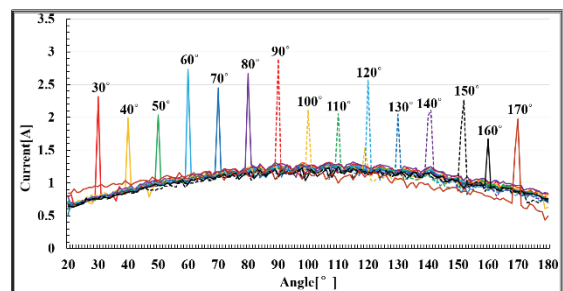


Fig. 7. Current fluctuation measurement graph(Forward).

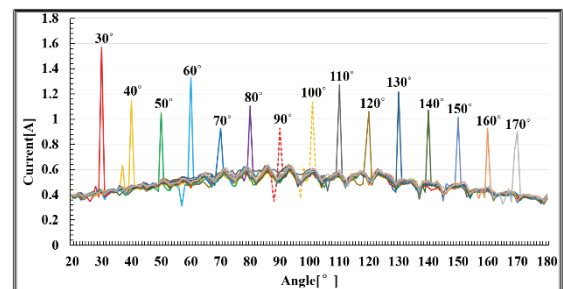


Fig. 8. Current fluctuation measurement graph(Reverse).

측정 기능이 시작되면, 관절의 상한 한계 각도부터 측정한다. 상한각도 방향으로 416 [RPM]의 모터 속도로 회전한다. 전류 센서로부터 전류값을 0.5초마다 읽어오고, 현재값과 이전값의 전류 변화율을 계산한다. 전류 변화율 계산이 끝나게 되면, 이전값에 현재값 데이터를 저장한다. 만약, 전류의 변화율이 100% 이상이라면, 관절의 한계 가동 각도라고 인식한다. 100% 미만이라면 다시 이전의 과정들을 똑같이 반복한다. 한계 가동 각도라고 인식되면, 상한각도 측정이 끝나고 3초 뒤에 위와 같은 과정으로 관절의 하한 한계 각도 측정을 진행한다.

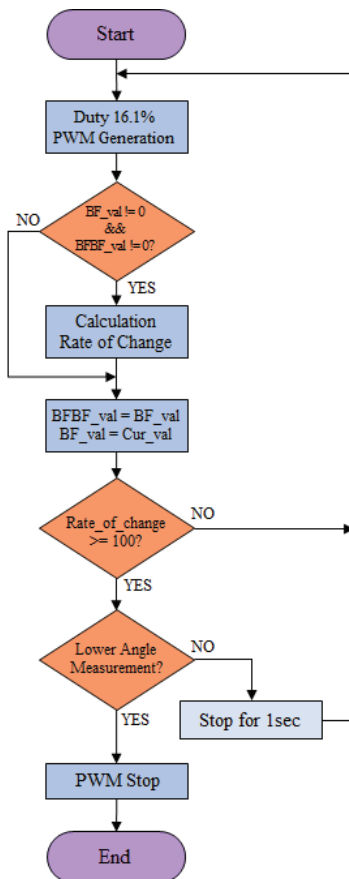


Fig. 9. Flow chart of ROM measurement function.

4. 결 론

대한민국은 현재 고령 사회이며, 2030년도에 초고령사회에 진입할 것으로 예상되고 있다. 고령 인구가 증가함에 따라 퇴행성관절염을 비롯한 여러 관절질환 환자의 수가 꾸준히 증가하고 있다. 고령인구에서 흔히 발생하는

퇴행성관절염을 효과적으로 치료하기 위해서는 연속수동운동 의료기기가 필요하다. 국내 연속수동운동 의료기기는 기능이 제한적이고, 고가의 수입 의료기기에 대한 수입의존도가 높은 상황이다. 이를 해결하기 위해 기존의 복합관절 연속수동운동 의료기기에는 없는 전류 센서를 이용한 관절의 가동범위 측정 기능을 설계하였다. 관절 경직에 의한 힘이 DC모터에 흐르는 전류를 크게 증가시킨다는 점을 이용하여 알고리즘을 설계하였다. 실험 결과, 모터가 정방향으로 회전할 때는 전류 평균변화율이 110.23%, 역방향으로 회전할 때는 전류 평균변화율이 136.46%로 전류의 변화율을 이용하여 관절의 가동범위를 측정할 수 있음을 확인하였다. 또한, 코로나19로 인한 비대면 경제확산, 인구 고령화에 따른 만성질환자 비중이 증가됨에 따라 의료분야에서의 디지털 헬스케어 필요성이 점차 확대되고 있는 추세이다. 따라서, 본 논문에서는 디지털 헬스케어 추세에 맞게 재활 운동정보 및 가동범위 측정 결과를 안드로이드 스튜디오로 개발한 블루투스 애플리케이션을 통해 실시간으로 확인할 수 있도록 하여 연속수동운동 의료기기의 성능 향상을 도모하였다.

감사의 글

본 연구는 2023년도 청주대학교 연구장학 및 2023년도 충청북도의 “디지털헬스케어 의료기기 기술개발 지원사업” 지원을 받아 수행된 연구결과입니다.

참고문헌

1. Kang Won Lee, Oh Yang, “A Study on the Measurement of the Range of Joint Operation of Continuous Passive Motion Device”, The 2023 Fall Conference of Korean Institute of Information Technology, vol.18, no. 2, pp.1515-1517, (2023).
2. Y. H. Han, G. S. Shin, M. S. Kang, D. B. Shin, S. H. Hwang, “A Study of Joint Mechanism of Knee Continuous Passive Motion Machine considering Human Knee Joint”, The 2015 Spring Conference of Korean Society for Precision Engineering, pp. 812-812, (2015).
3. Kweon O Seong, Lee Byeong Jong, Kim Agnes Jihae, Kim Se Hee, “A Study on Shoulder CPM Design Guideline Considering Body Size of Korean”, Journal of the Korean Society of Design Culture, vol. 22, no. 2, pp. 39-49, (2016).
4. Hojun Yeom, Hyun-Woo Jeong, Sangsoo Park, “A Study on the History of the Korean Medical Device Industry and its Global Competitiveness”, The Journal

-
- of the Convergence on Culture Technology, vol. 8, no. 5, pp. 1-7, (2022).
5. Kang Won Lee, Oh Yang and Chang Ho Lee, "Design of Multifunctional Compound Joint Medical Equipment for Continuous Passive Motion", Journal of the Semiconductor & Display Technology, vol. 21, no. 4, pp. 126-131, (2022).
 6. Monn Yong, "A Study on the Development Issues of Digital Health Care Medical Information", Industry Promotion Research, vol. 7, no. 3, pp. 17-26, (2022).
 7. <https://m.khan.co.kr/economy/industry-trade/article/202011022136025#c2b>
 8. Woon Ho Park, Oh Yang, "Implementation of the BLDC Motor Speed Control System using VHDL and FPGA", Journal of the Semiconductor & Display Technology, vol. 13, no. 4, pp. 71-76, (2014).
 9. Hyun-Soo Jin, "Implementation of Radio Frequency Communication System based Serial UART Communication", Journal of Digital Convergence, vol. 12, no. 12, pp. 257-264, (2014).
 10. Kiwan Kim, Jonghyun An, Kwangmin Park, "A Portable ECG System Coupled with a Smartphone", Journal of the Semiconductor & Display Technology, vol. 20, no. 1, pp. 7-11 (2021).
-
- 접수일: 2023년 11월 24일, 심사일: 2023년 12월 8일,
게재확정일: 2023년 12월 12일