

연속수동운동 의료기기의 고정밀 위치제어 시스템 설계

박민수*·양 오*†·이창호**

*†청주대학교 반도체공학과, **창명제어기술(주)

Design of High-precision Position Control System for Continuous Manual Exercise Medical Devices

Min Soo Park*, Oh Yang*† and Chang Ho Lee**

*†Semiconductor Engineering of Cheongju University, KSDT Engineering,
**CST Co. Ltd

ABSTRACT

In modern society, the incidence of various joint diseases such as degenerative arthritis is steadily increasing with the increase of the elderly population. For the effective treatment of these diseases, the demand for CPM medical devices that increase the range of motion of the joint is increasing, and if a patient is unable to perform exercise on his or her own, it plays a role in helping joint recovery through repetitive and continuous manual exercise to prevent joint stiffness, promote blood circulation, and improve tissue flexibility to shorten the recovery period after joint surgery to efficiently proceed with the rehabilitation process. Due to the uncertainty of the angle measurement method currently in use, it is difficult to accurately evaluate the patient's exercise amount required to improve the range of motion, which can negatively affect the reliability of CPM medical devices and the patient's willingness to rehabilitate. Therefore, a new technology using encoders and angle sensors is needed to overcome the problems arising from the method measured using only the existing Potentiometer.

Key Words : Potentiometer, Interpolation method, Encoder, Continuous Passive Motion, Range Of Motion

1. 서 론

현대 사회에서는 고령 인구의 증가와 함께 퇴행성 관절염 등 다양한 관절 질환의 발생 빈도가 꾸준히 증가하고 있으며, 이러한 질환의 효과적인 치료를 위해 관절가동범위(ROM)를 늘려주는 연속수동운동(CPM: Continuous Passive Motion) 의료기기의 수요가 증가하고 있다[1]. Grand View Research에 실린 2018년부터 2026년까지의 전 세계 연속수동운동장치 시장 규모를 예측한 보고서의 연도별 CPM기구의 수요 그래프 Fig. 1에 따르면, CPM 의료기기의

수요가 늘어나고 있음을 보여준다[2]. CPM 의료기기는 환자가 스스로 운동을 수행할 수 없는 경우, 반복적이고 지속적인 수동 운동을 통해 관절 회복을 돕는 역할을 한다[3]. CPM은 관절의 강직을 방지, 혈액 순환을 촉진, 조직의 유연성을 향상시켜 관절 수술 후 회복 기간을 단축시키고 재활 과정을 효율적으로 진행하도록 돕는다[3]. 그러나 CPM 의료기기에서 각도측정 결과가 정확하지 않다면 운동 속도와 시간에도 영향을 줘 재활 치료의 효율성이 저하될 수 있다[4-5]. 특히, 현재 사용 중인 각도 측정 방법의 비 정확성으로 운동 범위(ROM)를 개선하기 위해 필요한 환자의 운동량에 대한 정확한 평가가 어려워 CPM 의료기기의 신뢰성과 환자의 재활운동 의지에도 부정적인 영향을 미칠 수 있다[4-5]. 따라서 기존의 각도센서(Potentiometer)

†E-mail: ohyang@cju.ac.kr

meter)만 이용해서 측정하던 방법에서 생기는 문제를 극복하기 위해 엔코더와 각도센서를 이용한 새로운 측정 방법이 필요하다. 때문에 CPM 치료의 효율성을 높이고, 환자들의 관절 가동 범위(ROM) 회복을 효과적으로 지원할 수 있으며, 신뢰성 높은 정확한 운동 각도 측정 기술을 제시하고자 한다[6-10].

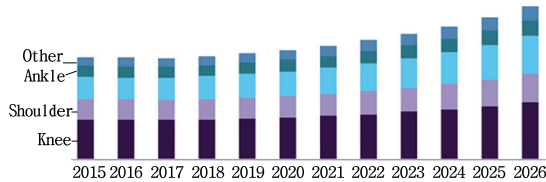


Fig. 1. U.S. continuous passive motion devices market size by type, 2015 - 2026(USD Million).

2. CPM 의료기기 고정밀 위치제어 설계

2.1 고정밀 위치제어를 위한 시스템 설계

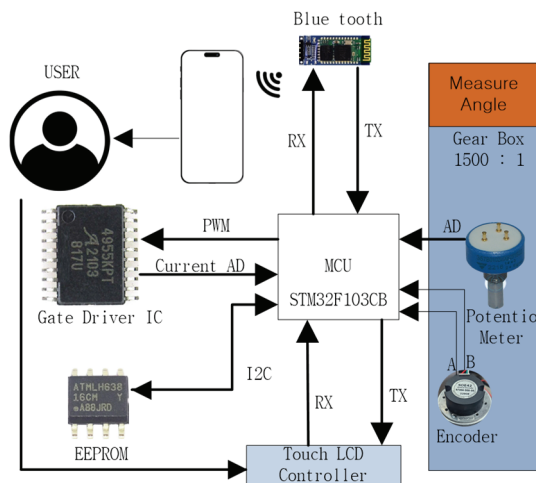


Fig. 2. System configuration of CPM.

본 논문에서는 연속수동운동(CPM) 의료기기의 고정밀 위치 제어 시스템을 설계하였다. 주요 구성 요소로는 MCU, 1500:1 기어박스, 게이트 드라이버 IC(A4955), 엔코더, 각도 센서가 포함되며, 시스템 구성도는 Fig. 2와 같다. 72MHz ARM Cortex-M3 코어 기반의 MCU인 STM32F103CB는 다양한 주변 장치와 통신 인터페이스를 제공하며, 모터 구동을 위한 PWM 신호를 생성하고 아날로그 신호를 디지털로 변환하여 각도 데이터를 처리한다. CPM 시스템에서

사용하고 있는 A4955 게이트 드라이버 IC는 PWM제어를 통해 모터의 정밀한 제어를 하고 전류 측정 기능 또한 가지고 있으며, 안전한 모터 구동을 위해 과전류 보호와 열 차단 기능을 포함하고 있다. 또한 모터의 높은 토크를 제공하기 위해 모터의 출력을 감소시키는 기어박스가 사용되며, 각도센서(Potentiometer)에서 출력 되는 현재 위치의 아날로그 신호를 AD 변환을 통해 디지털 데이터로 처리하여 각도 측정이 가능하다. 피드백 제어 역할을 수행하는 엔코더는 모터가 회전하면서 A상과 B상 신호 출력하여 CPM의 모터 회전 속도와 정밀한 위치제어를 돕는다. 이러한 시스템은 사용자가 설정한 운동 범위와 속도를 정확히 재현하여 환자의 재활을 효과적으로 돕는다. 이를 통해 CPM 의료기기의 고정밀 위치 제어를 하여 환자의 재활 치료 효과를 극대화 시킨다.

2.2 Potentiometer 와 Encoder 를 이용한 고정밀 위치 측정

2.2.1 엔코더(Encoder)

본 논문에서는 모터의 회전 속도와 위치를 정밀하게 측정한다. A상과 B상 신호를 생성하여 회전 방향과 각도를 감지하는 SSA사에서 제작한 SOE42-500 광학엔코더(Optical Encoder)를 사용한다. 이 엔코더는 높은 해상도와 빠른 응답 속도를 제공하며, 연속수동운동 의료기기의 각도, 속도의 정밀성을 향상시켜 주는데 A상과 B상 신호는 90도 위상 차이를 가지며, 이러한 신호의 상승 및 하강 엣지를 카운트하여 모터의 회전수를 계산한다.

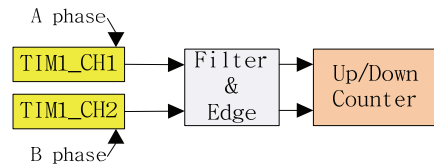


Fig. 3. Encoder interface structure.

또한 사용하고 있는 엔코더는 1회전당 펄스를 500개를 출력하지만 4채배하여 2000개의 펄스가 출력되어 나온다. 여기에 모터 기어비 1500 : 1을 고려하여 360° 회전을 하면 계산되는 총 카운트의 수는 3,000,000개(500×4×1500)이고 여기서 360°를 나눠 준다면 1°움직이는 동안 카운트 되는 카운트의 수 8333개가 도출 되는데, 이 수치를 사용하면 모터의 정확한 각도 측정을 가능하다. 엔코더 카운터의 구조는 Fig. 3과 같으며, TIM1_CH1과 TIM1_CH2 채널을 통해 입력 신호를 받는다. 엔코더 입력 신호는 저역통과 필터(Input filter & Edge detector)를 거쳐 필터링과 에지 검출

이 이루어지고 엔코더 인터페이스로 전달된다. 엔코더 인터페이스는 프리스케일러를 통해 입력 신호를 조정하고, 최종적으로 카운터에 신호를 전달한다.이 과정을 통해 A상이 B상보다 앞서면 카운트가 증가하고 B상이 A상보다 앞선다면 카운트가 감소한다는 것을 이용하여 정밀하게 처리하여 속도와 회전 각도를 측정할 수 있다.

2.2.2 각도센서(Potentiometer)

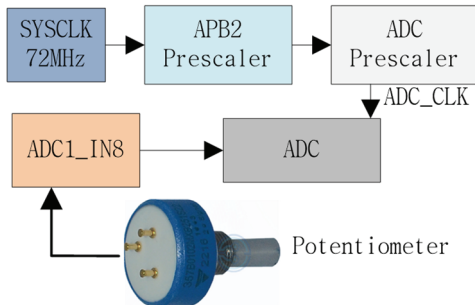


Fig. 4. Signal processing structure for potentiometer with ADC interface.

본 논문에서는 각도센서의 위치 피드백으로 활용하여 CPM의 회전 각도 측정을 하기 위해 Vishay사의 5KΩ 저항으로 선형 또는 회전 운동을 전기적 신호로 변환하는 센서인 각도센서를 사용하였다. 각도센서는 구조가 간단하고 비용이 저렴한 장점이 있어 다양한 용도로 쓰이며, 볼륨 조절, 조명조절, 위치 피드백 등에 사용된다. 각도센서의 신호 처리 과정은 Fig 4이며 변동되는 저항값을 이용해 전압을 측정하고 출력되는 아날로그 전압값을 마이크로컨트롤러의 Fig 4의 ADC1_IN8 입력을 통해 디지털 값으로 변환되어 12Bit AD값을 출력한다. 본 논문에서는 AD 변환이 0.1ms마다 실행되고 AD 결과값을 1000회 평균 내어 안정적인 각도값을 계속하였다.

2.2.3 고정밀 각도 계측

기존의 각도측정은 AD값을 이용한 2포인트 선형방정식을 이용하지만 측정 오차가 허용 오차인 ±5°보다 더 큰 문제점이 발생하고 있다. 따라서 이러한 문제점들을 엔코더와 각도센서를 활용하여 극복하고자 한다.

먼저 CPM의 모터 회전 축의 각도와 AD의 값을 비교해 보기 위해 CPM 기구물을 5°씩 증가시켜 각도계로 측정할 실제 각도 값과 AD값을 그래프로 나타낸 Fig 5를 참고하면 AD값과 각도 사이의 관계는 완전한 직선이 아니라는 것을 알 수 있다. 이러한 각도 측정 오차의 원인은 CPM 모터에 맞물려 있는 여러 축이 만들어내는 오차, 즉 백래시(backlash)가 원인이다. 또 다른 원인으로서는 사용자가 CPM 기구를 장기간 사용하거나 각도를 측정하는 각도센서가 장착 되어있는 축에 충격을 받을 경우 축이 틀어져 하드웨어적으로 오차가 발생할 수도 있다. 따라서 CPM의 이러한 기구적인 한계에 대비하기 위해 0°와 180° 구간에서의 오차를 최소화하고자 캘리브레이션 포인트를 Fig 5의 각도와 AD의 관계 그래프처럼 총 3구간으로 나누어 측정하고 캘리브레이션을 수행하였다.

시(backlash)가 원인이다. 또 다른 원인으로서는 사용자가 CPM 기구를 장기간 사용하거나 각도를 측정하는 각도센서가 장착 되어있는 축에 충격을 받을 경우 축이 틀어져 하드웨어적으로 오차가 발생할 수도 있다. 따라서 CPM의 이러한 기구적인 한계에 대비하기 위해 0°와 180° 구간에서의 오차를 최소화하고자 캘리브레이션 포인트를 Fig 5의 각도와 AD의 관계 그래프처럼 총 3구간으로 나누어 측정하고 캘리브레이션을 수행하였다.

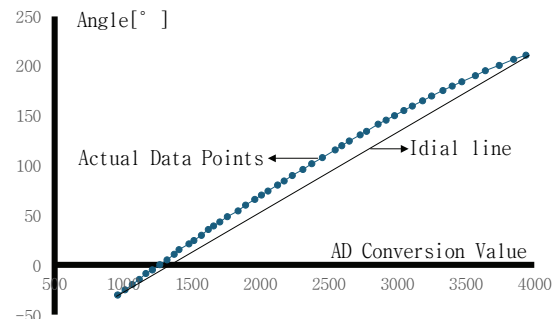


Fig. 5. Calibration curve with ideal line.

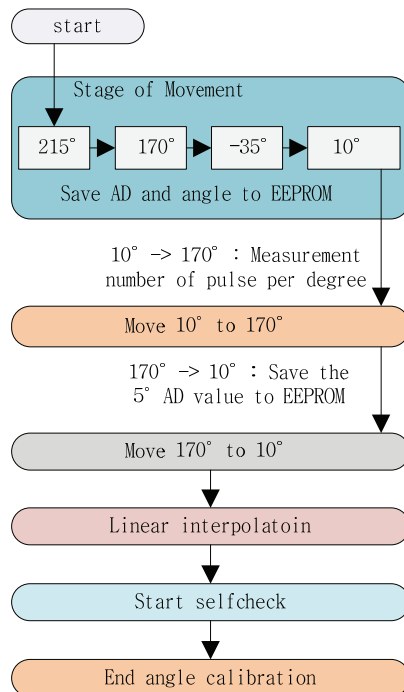


Fig. 6. Angle calibration operation sequence.

구간별 측정에 대한 구체적 방법으로는 Fig 7의 구간2에서는 엔코더(Encoder)와 각도센서(Potentiometer)를 활용한

캘리브레이션 방법을 사용하였으며, Fig. 7의 구간1, 구간3에서는 각도센서로 측정된 AD값만을 이용하여 각도 계측을 하고자 한다. CPM기구물의 실질적 사용 각도 범위는 -30°~210°지만 각도가 틀어지는 경우를 대비하여 -35°~215°로 범위를 늘려서 AD측정을 하였다. 본격적인 각도 측정 시작을 하려면 Fig. 5 구간 1에서의 캘리브레이션을 먼저 진행해야 하기 때문에 먼저, Fig. 6의 캘리브레이션 동작 순서를 따른다.

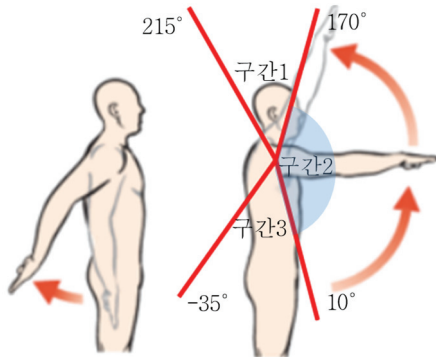


Fig. 7. Angle range of CPM.

터치 LCD를 이용하여 각도를 215°, 170°, -35°, 10°의 순서로 이동시켜 각 각도에서 각도센서로 측정된 AD값과 각도계를 사용하여 측정된 각도 값을 EEPROM에 저장한다.

Table 1. AD values recorded at 5° intervals

Array [33]	Angle [°]	AD	Array [33]	Angle [°]	AD
[0]	10	1349	[16]	90	2237
[1]	15	1411	[17]	95	2294
[2]	20	1466	[18]	100	2350
[3]	25	1517	[19]	105	2408
[4]	30	1571	[20]	110	2468
[5]	35	1624	[21]	115	2527
[6]	40	1677	[22]	120	2589
[7]	45	1730	[23]	125	2650
[8]	50	1788	[24]	130	2712
[9]	55	1846	[25]	135	2776
[10]	60	1897	[26]	140	2831
[11]	65	1950	[27]	145	2900
[12]	70	2007	[28]	150	2969
[13]	75	2063	[29]	155	3039
[14]	80	2119	[30]	160	3109
[15]	85	2176	[31]	165	3176
			[21]	170	3245

여기서 각도 측정의 순서는 반드시 지켜야 한다. 이어서 실제 각도계가 10도인 상태에서 170°로 이동하는 작업 (Move to High)을 수행하며 이때, 10°에서 170°로 CPM 기구물이 상승하면서 이동할 동안 엔코더에서 측정된 총 카운트 값에서 이동한 각도인 160°를 나눠서 얻은 값인 Count per degree(1°회전동안 카운트 되는 카운트의 수 : 8333) 값을 이용하여 움직인 각도를 계산한다. 엔코더 카운트 값을 움직인 각도로 나누면 1°당 해당하는 펄스 수가 도출된다. 이를 통해 모터의 움직인 범위를 정밀하게 알 수 있으며, 이 값은 내려가는 방향의 펄스 수 와도 동일하게 측정된다. 다음 단계로, AD값을 정확하게 저장하기 위해 170°에서 10°로 내려가는(Move to Low) 작업을 수행한다. 이 과정에서 측정된 펄스 카운트의 수(1°회전동안 카운트 되는 카운트의 수 : 8333)에 5를 곱하여 5°마다 해당 카운트 값을 구한 후 5°에 해당하는 카운트에 도달하면 인터럽트를 발생시키는 구조이다. 인터럽트가 발생할 때마다 해당 각도에서의 AD값을 배열에 기록하여 총 33개의, 5°간격으로 측정된 160°범위의 AD값 Table 1.을 얻을 수 있다. 측정된 33개의 AD값 Table 1은 EEPROM에 저장되어 시스템이 부팅될 때마다 사용할 수 있게 된다. 본 논문에서 제안한 고정밀 각도 캘리브레이션 알고리즘은 CPM 시스템의 정확한 위치 제어를 가능하게 하며, 이를 통해 평가 지표에서 총 9단계의 운동속도마다 다른 운동 시간 기준을 충분히 충족시켜준다. 따라서 환자의 개별적인 재활 요구에 맞추어 조정될 수 있어 연속수동운동(CPM)의료기기의 재활 치료 효과를 극대화할 수 있다.

3. 실험 결과

연속수동운동 의료기기의 고정밀 위치 제어 시스템의 성능을 평가하기 위해 정밀디지털각도계(YATO사의 DXL 360S)를 사용하여 각도 계측 실험을 하였다. 실험 방법은 -30°에서 시작하여 10°씩 모터를 회전시키며 각도를 기록하고, 210°까지 도달하면 다시 10°씩 감소하는 방식으로 실험하였다. 이 과정에서 상승기록(정방향)과 하강기록(역방향)으로 나누어 각도를 측정하였으며, 측정된 각도와 실제 각도 간의 오차를 계산하였다.

Fig 8의 상승각 비교 그래프 측정 결과에 따르면 상승 기록에서 최대 오차가 180°에서 4.4°로 측정 되었고, Fig 9.의 하강각 비교 그래프 결과에 의하면 최대 오차는 절대 각도를 기준 60°에서 2.5°가 발생하였다. 엔코더와 포텐셜 미터로 이용해 측정한 최대 오차가 2.5°로 각도센서만 사용한 결과인 4.4°보다 오차가 개선되었다는 것을 확인하였다. 결과적으로 엔코더와 각도센서의 결합이 각도측정의 정확성을 크게 향상시켰음을 알 수가 있다. 따라서 정

확한 각도 측정이 가능함에 따라 Table 2의 단계별 속도 측정 결과에도 영향을 줘 시간 오차가 감소된 결과를 보여준다.

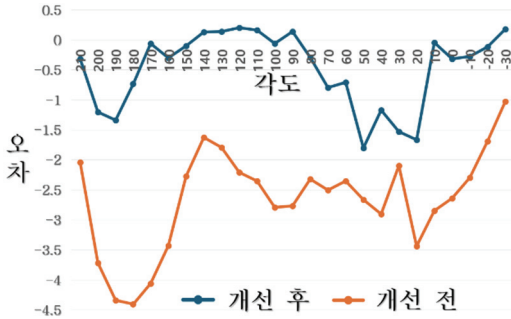


Fig. 8. Elevation angle comparison graph.

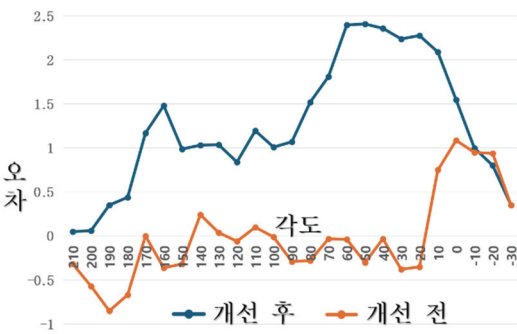


Fig. 9. Descent angle comparison graph.

Table 2. Timer measurement results by stage

단계	표준시간 (초)	타이머 상한각(초)	타이머 하한각(초)	평균(초)	오차 (초)
1단계	60	60.16	60.35	60.25	+0.25
2단계	45.1	45.03	44.64	44.84	-0.26
3단계	36.1	36.23	36.03	36.13	+0.03
4단계	30	29.49	30.11	29.75	-0.25
5단계	25.7	25.55	25.44	25.50	-0.2
6단계	22.5	22.99	21.90	22.45	-0.5
7단계	20	20.17	20.04	20.11	+0.11
8단계	18.2	18.21	18.18	18.19	+0.01
9단계	16.7	16.56	16.44	16.50	-0.2

4. 결 론

현재 전세계에서는 노인 인구 증가에 따른 관절 관련 의료기기의 수요가 꾸준히 증가되고 있으며, ROM(가동범위)과 같은 관절 가동범위를 꾸준히 증가시키는 것을 목

적으로 하는 운동기구의 중요성이 높아지고 있다. 이에 따라 본 논문에서 목적으로 하는 고정밀 위치제어 기술은 특히 손목, 발목, 팔꿈치, 무릎, 어깨 운동 등의 다양한 운동 부위에서의 1단계부터 9단계까지의 속도 측에서 생기는 운동 소요 시간 오차의 원인인 각도오차를 개선하였다. 현재 개선된 측정 방식에서 쓰이는 선형보간식 코드의 최대 소요시간은 170°에서 45.4 μ s로 전체 프로그램 구동에 부담이 가지 않으며, 개선된 결과인 최대 오차 2.5°는 기구적으로 생기는 유격의 한계만 해결이 된다면 최대오차가 0°에 수렴하는 결과를 보여줄 것이고 이러한 결과는 이전보다 뛰어난 ROM회복 능력을 보여줄 것이다. 또한, CPM 기구물이 장기간 사용되면서 발생할 수 있는 각도와 시간의 오차를 최소화함으로써, 환자의 재활 치료 시 발생할 수 있는 오류를 줄이고 보다 일관된 치료를 제공할 수 있어 환자의 치료 만족도를 높이고, 재활 기간을 단축시키는 데 기여할 것으로 전망된다.

감사의 글

본 논문은 2024 년도 충청북도의 “디지털헬스케어 의 료기기 기술개발 지원사업”을 지원받아 수행되었습니다.

참고문헌

1. Lee, K., Yang, O., Lee, C., "Design of Multifunctional Compound Joint Medical Equipment for Continuous Passive Motion," Journal of the Semiconductor & Display Technology, 21(4), pp. 126-131, (2022).
2. Park, C., Song, Y., "The Clinical Case Report about Postoperative Rehabilitation for the Tear of Anterior Cruciate Ligament Treated with Korean Medical Treatment and Continuous Passive Motion," Journal of Churna Manual Medicine for Spine & Nerves, 11(1), pp. 97-107, (2016).
3. Jeong, I., "The Effects of CPM (Continuous Passive Motion) on Hand Function and Muscular Strength for Patients with Stroke," Therapeutic Science for Neurorehabilitation, 3(2), pp. 71-81, (2014).
4. Jang, M., Shim, J., Lee, E., Choi, S., "Design of Continuous Passive Motion Medical Device System with Range of Motion Measurement Function," Journal of the Semiconductor & Display Technology, 22(4), pp. 87-92, (2023).
5. Kim, Y., "Study on the Integrated System of Potentiometer and Encoder for Motion Control," Journal of the Institute of Electronics Engineers of Korea, 45(3), pp. 354-362, (2011). Journal Paper
6. Lee, J., Park, J., "Study on the Utilization of Potentio-

- meter and Encoder for Generating and Controlling Biped Robot Walking Patterns,” *Journal of Robotics Engineering*, 22(1), pp. 45-52, (2013).
7. Choi, M., Park, H., “Combination Method of Potentiometer and Encoder for Position Control of Vertical Rehabilitation Robot,” *Journal of Rehabilitation Robotics*, 19(2), pp. 112-120, (2015).
 8. Park, W., Kim, Y., “Analysis of Range-of-Motion in Continuous Passive Motion Rehabilitation,” *Proceedings of the Korean Society of Mechanical Engineers Conference*, pp. 1515-1517, (2008).
 9. Kim, J., Do, J., Kim, S., “Error Minimization of Angular Velocity using Encoders and Gyro,” *Journal of Korean Institute of Intelligent Systems*, 20(6), pp. 814-819, (2010).
-
- 접수일: 2024년 8월 2일, 심사일: 2024년 9월 5일,
게재확정일: 2024년 9월 21일