

다기능 복합관절 연속수동운동 의료기기 설계

이강원*·양 오*†·이창호**

*†청주대학교 반도체공학과, **창명제어기술㈜

Design of Multifunctional Compound Joint Medical Equipment for Continuous Passive Motion

Kang Won Lee*, Oh Yang*† and Chang Ho Lee**

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

ABSTRACT

The number of joint disease patients is increasing every year. Currently, the most CPM(Continuous Passive Motion) equipment uses expensive imported equipment, and one CPM equipment is designed to be used only in one joint, medical personnel or hospitals who are the main users of the medical equipment need to have several types of CPMs for joint rehabilitation. To solve this problem, this paper designed a multifunctional joint medical equipment that enables rehabilitation of knee, shoulder, and elbow joints in one CPM equipment and includes general, intensive, and adaptive exercise functions for effective treatment according to the patient's condition. The patient's condition was diagnosed using a load cell and a current sensor. In this paper, effective rehabilitation methods were presented and high reliability and precision of medical equipment was confirmed through experiments using potentiometer, encoder, and PI controller.

Key Words : Continuous Passive Motion, Multifunctional, Rehabilitation equipment, Multiple Joints, PI controller

1. 서 론

연속수동운동(CPM : Continuous Passive Motion)은 관절 전 치환술이나 인대 재건술 등의 관절에 대한 수술 후 초기 재활치료 및 스스로 운동이 불가능한 환자의 회복을 돕기 위한 수단으로 지난 수십여 년 동안 널리 사용되어 왔다[1]. 건강보험심사평가원(HIRA)의 통계자료에 의하면 관절 질병으로 인한 환자 수가 Fig. 1과 같이 매년 증가하는 것을 확인할 수 있다. 재활치료 시 재활치료사의 도움을 받아 꾸준히 운동을 해야 치료효과가 있는데, 치료할 때마다 치료사의 도움을 받기에는 환자 수가 계속 증가하고 있기 때문에 인력이 매우 부족하다[2]. 따라서, 치료사 없이도 재활치료를 할 수 있도록 자동치료기구의 개

발이 필요하다[3].

그러나 현재 무릎관절과 관련된 CPM을 제외한 어깨, 팔꿈치, 발목, 손목 관절 등의 국산 의료기기가 부족하고, 대부분 고가의 수입 의료기기를 사용하고 있다.

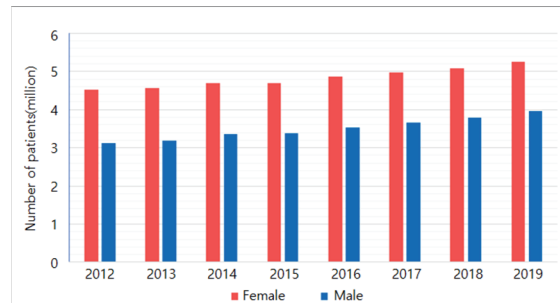


Fig. 1. Number of joint disease patients per year.

†E-mail: ohyang@cju.ac.kr

또한, 의료기기의 주된 사용자인 의료인 또는 병원의 입장에서는 각각의 관절 재활을 위한 여러 종류의 CPM 을 구비해야 되므로 비용적인 문제와 설치 공간의 낭비 문제, 장비의 사용법 숙지에 따른 의료인의 부담 문제 등이 있다. 관절 질병을 가진 환자마다 움직일 수 있는 가동 구간 및 범위 그리고 움직이는 속도가 다르다. 특히, 퇴행성 관절염 환자는 염증이 침범된 관절에 통증, 강직, 부종으로 인해 관절의 가동범위가 매우 제한적이고, 이를 효과적으로 치료하기 위해서는 재활기기를 통해 관절을 반복적으로 움직이면서 관절의 가동범위(ROM : Range Of Motion)를 늘려가면서 서서히 회복시켜야 한다[4]. 본 논문에서는 하나의 CPM에 무릎, 어깨, 팔꿈치 등 총3가지 관절 재활치료가 가능하게 하여 비용적인 문제, 설치 공간의 낭비, 장비의 사용법 숙지에 따른 의료인의 부담 문제 등을 해결하고, 환자의 상태에 따른 효과적인 치료를 위한 일반, 집중, 적응 운동기능이 들어간 다기능 복합관절 의료기기를 설계하고자 한다.

2. 다기능 복합관절 의료기기

2.1 복합관절 CPM 의료기기 설계

본 논문에서 설계한 복합관절 CPM은 Fig 2와 같이 높이 조절 가이드봉으로 본체의 높이를 조절하고, 관절부위에 따른 기구만 변경함으로써 하나의 의료기기로 어깨(Shoulder), 팔꿈치(Elbow), 무릎(Knee) 관절의 재활치료가 모두 가능하다. 본체 박스에 LCD핸드컨트롤러, DC모터 구동장치, 전원회로가 모두 내장되어 있기 때문에 현재 판매중인 CPM과 비교했을 때 구조가 단순하고, 부피가 많이 크지 않기 때문에 공간을 적게 차지하고, 경량화가 가능하다.

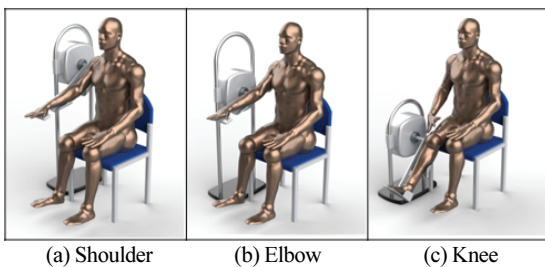


Fig. 2. Appearance of CPM according to the joint.

Fig 3의 다기능 복합관절 의료기기의 시스템 구성도를 보면 전원부를 제외하고, MCU, 모터, 각도센서, 전류센서, 로드셀, 엔코더, 컨트롤러 디스플레이 등으로 구성되어 있다. 환자마다 움직일 수 있는 구간, 범위, 속도가 다르

기 때문에 로드셀과 전류센서로 환자가 움직일 수 있는 구간 및 범위를 측정한다. 정확한 설정 각도 범위에서 재활치료를 할 수 있도록 감속비 3000대1의 기어박스에 배치된 각도센서를 통해 정밀한 각도계측을 하였다. 엔코더를 사용하여 DC모터의 RPM(Revolutions Per Minute)을 계산하고, PI제어기를 적용하여 설정한 속도에서 일정하게 운동할 수 있도록 하였다. 컨트롤러는5인치 터치 TFT LCD를 사용하여 일반 사용자가 직관적으로 사용 가능하도록 설계하였다. 또한, 환자의 운동치료 데이터를 저장 및 관리할 수 있도록 하여 환자와 의료 종사자에게 제공하고, 환자의 재활치료 주기관리 및 바른 운동자세에 대한 알림 기능을 수행하고, 기기 스스로 자가진단을 통한 유지 보수 및 수리 상황의 알림 등이 가능하도록 시스템의 기능을 향상하였다.

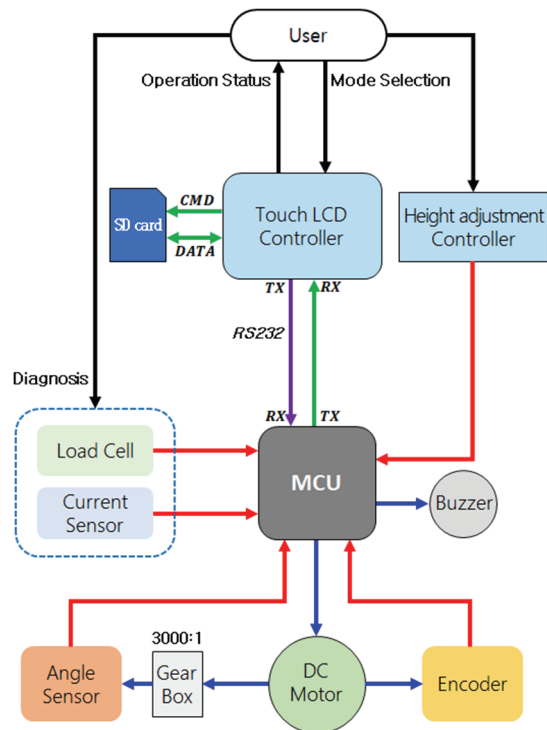


Fig. 3. System configuration of multifunctional joint CPM.

2.2 효과적인 재활치료를 위한 운동모드

관절 질병 환자의 효과적인 재활 치료를 돕기 위한 일반, 적응, 집중 운동 모드를 제시하고자 한다. 일반, 집중 운동은 운동횟수와 시간을 설정할 수 있고, 적응운동은 운동횟수를 설정할 수 있다. 설정한 최대 가동범위까지 점진적인 재활운동이 가능하다. 본 논문에서 설계한 다기능 복합관절 의료기기의 전체적인 동작순서는 Fig 4와 같다.

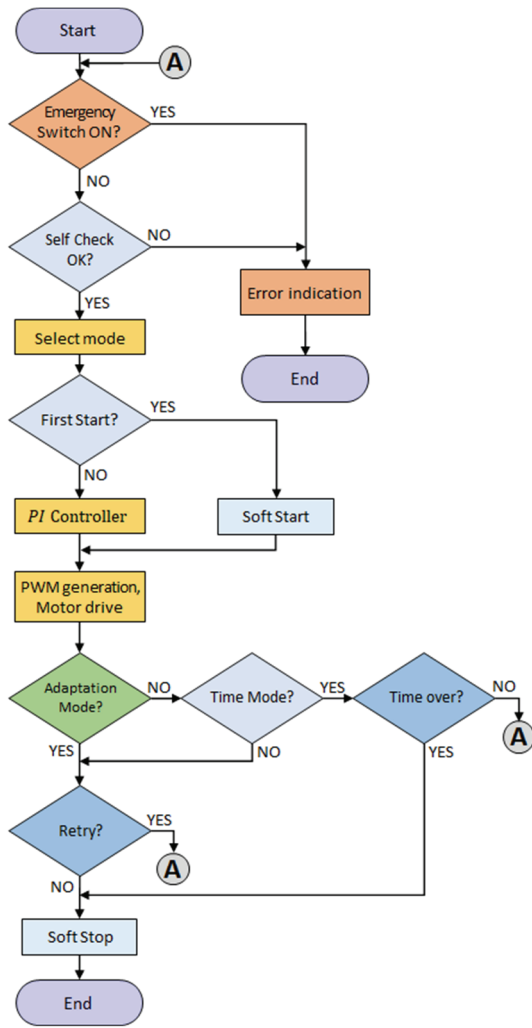


Fig. 4. Flow chart of multifunctional joint CPM.

관절 부위마다 가동범위 및 구간이 다르기 때문에 Table 1과 같이 각 관절 부위별 운동 프로그램에 따른 설정 가능한 각도 범위를 정하였다.

Table 1. Range of motion according to joint area

Joint area	Normal	Adaptive	Intensive
Shoulder	20~180 [°]	20~180 [°]	20~170 [°]
Elbow	0~150 [°]	0~150 [°]	0~150 [°]
Knee	-10~140 [°]	-10~140 [°]	-10~140 [°]

일반운동 모드는 가장 기본적인 관절 운동프로그램으로 사용자가 설정한 상한각도부터 하한각도까지 왕복하

는 운동 모드이다. 환자의 최대 가동 범위를 고려하여 상한각도, 하한각도, 운동속도를 설정할 수 있고, 환자의 치료 상태에 따라 더욱 빠른 재활을 위해 가속모드를 설정할 수 있다. 가속모드로 운동할 경우, 총 가동범위(ROM)에서 상위25%, 그리고 하위 25% 범위를 제외한 나머지 50%범위에서는 설정속도보다 더 빠르게 운동하게 된다. Fig. 5는 일반운동을 30분 설정하여 운동하였을 때 동작 순서이다.

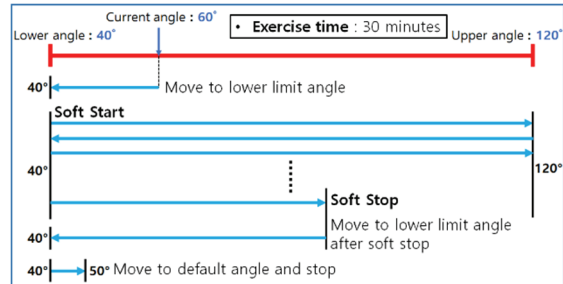


Fig. 5. Sequence of operation in normal exercise mode.

관절의 가동범위를 점차 늘려가면서 왕복운동해야 효과적인 치료가 이루어지는데, 일반운동 모드는 정해진 각도 범위내에서만 운동하기 때문에 완전한 치료에는 한계가 있다. 따라서, 환자가 원하는 각도까지 점진적으로 가동범위(ROM)를 늘려가면서 운동하는 적응운동 모드를 제시하고자 한다. 적응운동 모드는 설정한 적응각도만큼 가동범위를 좁게 하여 초기각도로 정하여 운동을 시작하게 되는데, 정해진 운동횟수만큼 왕복운동 할 때마다 Fig. 6과 같이 가동범위를 1도씩 늘려가며 운동하게 된다. 점진적으로 가동범위를 늘려 나가면서 운동하기 때문에 관절에 무리가 가지 않으면서 효과적인 치료가 가능하다.

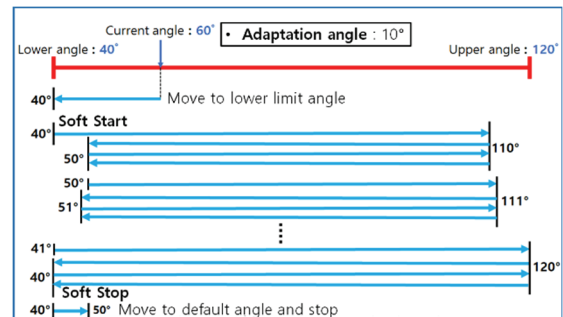


Fig. 6. Sequence of operation in adaptive exercise mode.

관절 가동범위의 증진을 위해서 관절 가동 끝 범위에서 반복운동 해야 하며[9], 각도운동을 단계적, 집중적으

로 실시해야 한다[10]. 따라서, 마지막으로 제시할 운동프로그램은 집중운동 모드이다. 집중운동은 Fig 7과 같이 가동범위 끝부분에서 설정한 집중각도만큼 집중적으로 반복하여 운동함으로써 환자가 움직일 수 있는 관절의 최대각도를 늘려주는 재활운동 프로그램이다. 환자가 원하는 부분만 집중적으로 운동할 수 있기 때문에 효율적인 재활치료가 가능하다는 장점이 있다.

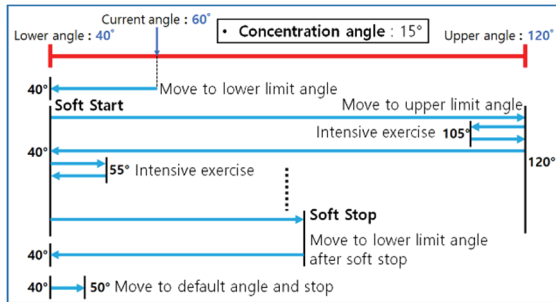


Fig. 7. Sequence of operation in intensive exercise mode.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 각도센서를 이용한 정밀한 각도 계측

CPM 기구물에 각도센서(Potentiometer)를 부착하여 정밀한 각도 계측을 함으로서 환자가 정확한 가동범위에서 운동할 수 있도록 하였다. MCU에 내장된 12비트 A/D 컨버터를 이용하면 각도센서에서 출력되는 전압 데이터를 통해 관절의 각도 측정시스템을 구축하였다[5]. 환자의 관절각도를 측정하기 위해 각도센서를 DC모터와 감속비 3000대1로 연결되어 있는 기어박스의 최종 운동 축 기어에 부착하였다.

본 논문에서는 각도센서(VISHAY사의 357모델 5k옴)를 사용하였고, MCU(STM32F103CB)내부의 12비트 ADC를 이용하여 각도센서에서 출력되는 전압 값을 읽어 들었다. AD값을 이용한 정밀한 각도 계측값을 비교하기 위해 분해능이 0.01도인 정밀디지털각도계(YATO사의 DXL360S)를 사용하여 각도계측 실험을 진행하였다. CPM 기구물의 운동 축에 디지털각도계를 고정시킨 후, 축의 각도를 0도에서 10도씩 증가시켜 180도까지 측정하였다. 각도센서를 통해 얻은 측정값과 디지털각도계의 표준값을 비교하여 Table 2와 같은 결과를 얻었다. 시판되는 의료기기의 운동 각도는 오차가 ±10도인데, 본 연구에서 설계된 방법을 이용하여 오차가 -0.2-0.72도로 정밀한 각도계측 및 제어 가능한 것을 확인하였다.

Table 2. Experimental results of Potentiometer

Standard [°]	Measurement [°]	Error [°]	Standard [°]	Measurement [°]	Error [°]
0.12	0.02	0.1	91.18	90.63	0.55
3.97	3.39	0.58	101.26	100.54	0.72
11.4	11.31	0.09	111.18	110.62	0.56
20.74	20.77	-0.03	121.27	120.59	0.68
30.75	30.83	-0.08	131.22	130.67	0.55
40.38	40.58	-0.2	141.01	140.62	0.39
50.68	50.84	-0.16	150.8	150.81	-0.01
60.62	60.48	0.14	160.63	160.55	0.08
70.9	70.55	0.35	170.86	170.39	0.47
81.05	80.51	0.54	180.1	180.03	0.07

3.2 PI 제어를 이용한 모터 속도 제어

환자마다 팔이나 다리의 무게가 다르고, 관절상태(가동범위, 구간)가 다르기 때문에 설정한 운동프로그램의 운동속도로 모터의 속도를 일정하게 유지하기 위해서 DC 모터의 피드백제어가 필요하다. 따라서 모터를 제어하는데 있어 신뢰성과 정밀도를 높이기 위해 PI제어를 사용해야 한다[6]. 본 논문에서는 모터의 속도를 측정하기 위해 1회전당 500개의 펄스가 출력되는 엔코더를 사용하였다. 엔코더에서는 A상, B상의 두 신호가 출력되는데, 이 두 신호는 90도의 위상차를 가지고 있으며[7], 이 위상차로 모터의 회전 정회전 또는 역회전 방향을 판단한다[8]. 모터의 속도가 빠를수록 더 많은 펄스가 출력되고, 이 펄스를 계수하여 모터의 속도(RPM)를 계산할 수 있다. 단위시간 동안 몇 바퀴를 회전했는지 카운팅하여 RPM을 계산하는 M방식을 이용하였다. PI제어를 사용하여 엔코더를 통해 계산한 모터의 속도와 사용자가 설정한 운동속도를 비교하여 실시간 오차값, 오차의 누적값을 이용하여 제어값을 계산한 후, 모터의 속도가 일정하게 유지되도록 하였다. PI제어 전과 후로 나누어 실험하여 Table 3과 같은 결과를 얻었다.

Table 3. Experimental results of PI controller

Set speed (RPM)	RPM measured by Encoder			
	Load : 2kg		Load : 5kg	
	Normal	PI control	Normal	PI control
831	772	834	711	833
1389	1265	1390	1218	1388
1917	1798	1917	1725	1917
2499	2296	2501	2199	2501

3.3 운동모드에 따른 실험결과

본 논문에서 설계한 다기능 복합관절 의료기기는 효과적인 재활치료 운동 뿐만 아니라 사용자(의료인, 환자)가 직관적으로 기기를 사용할 수 있도록 5인치 터치 TFT LCD 컨트롤러를 적용시켰다. 현재 운동 상태에 대한 정보를 직관적으로 확인할 수 있다. 운동 모드, 운동속도, 남은 운동횟수 및 시간을 확인할 수 있고, Fig. 8과 같이 현재 운동 부위 및 상태(각도)를 그림을 통해 확인할 수 있다. (a)는 일반운동 모드로 무릎관절 재활치료 중일 때의 LCD 화면이다. 최고속도(7단계), 가속모드로 운동 중이고, 남은 운동시간은 1시간30분이며 현재 각도의 위치가 45도인 것을 확인할 수 있다. (b)는 적응운동 모드로 팔꿈치관절 재활치료 중일 때의 LCD 화면으로, 3단계의 속도로 운동 중이고, 총 30회중 운동한 횟수가 5회이며 현재 각도의 위치가 100도인 것을 확인할 수 있다. (c)는 집중운동 모드로 어깨관절 재활치료 중일 때의 LCD 화면이다. 5단계의 속도로 운동 중이고, 총 30회중 운동한 횟수가 10회이며 현재 각도의 위치가 130도인 것을 확인할 수 있다. 현재 진행중인 각도에 따라 화면에 표시되는 관절의 위치가 달라지는 것을 실험을 통해 확인할 수 있었다.

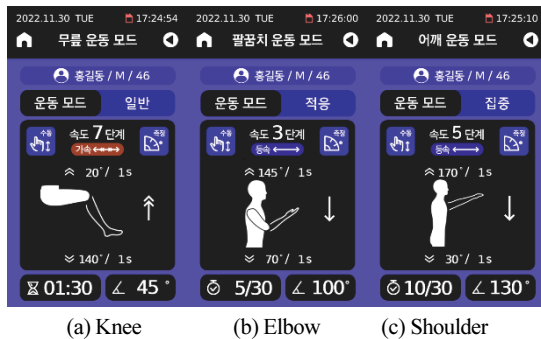


Fig. 8. LCD screen according to the exercise area and mode when exercising.

또한, SD카드에 환자에 대한 운동치료 정보를 CSV형식으로 저장하여 환자마다 어느 관절 부위를 어떤 운동프로그램으로 진행해왔는지 확인할 수 있다. 과거에 진행했던 운동데이터를 활용하면 효율적인 재활치료에 도움이 될 수 있다. 그리고, 자가진단을 통한 유지 보수 및 수리상황의 알림을 LCD화면에 표시해주고, 실시간으로 센서, 엔코더의 상태, 과도전류, 비상스위치 ON여부를 확인한다. 오류가 발생하면 진행중이던 운동은 비상 일시정지되어 환자를 안전사고로부터 지켜준다.

4. 결 론

관절 질병 환자수는 매년 증가하고 있으며 현재 CPM 들은 대부분 고가의 수입 장비를 사용하고 있고, 하나의 CPM은 하나의 관절에만 사용가능 하도록 설계되어 있기 때문에 의료기기의 주된 사용자인 의료인 또는 병원의 입장에서는 각각의 관절 재활을 위한 여러 종류의 CPM 을 구비해야 되므로 비용적인 문제와 설치 공간의 낭비 문제, 장비의 사용법 숙지에 따른 의료인의 부담 문제 등이 있다. 본 논문에서는 이를 해결하기 위해 하나의 CPM 에 무릎, 어깨, 팔꿈치 등 총3가지 관절 재활치료가 가능하고, 환자의 상태에 따른 효과적인 치료를 위한 일반, 집중, 적응 운동기능이 들어간 다기능 복합관절 의료기기를 설계하였다. 로드셀과 전류센서를 이용하여 환자상태를 진단하고, 각도센서와 엔코더를 사용하여 현재 운동중인 각도와 속도를 측정하고, PI제어기를 적용하여 설정한 운동속도대로 일정하게 운동하도록 하여 효과적으로 재활치료가 가능하게 하였다. 또한, 5인치 터치 LCD 컨트롤러로 사용자가 직관적으로 조작할 수 있도록 하였고, SD카드에 환자의 정보 및 재활치료 운동 진행상태를 저장함으로써 앞으로 진행할 재활치료에 활용될 수 있도록 하였다. 또한, 의료기기의 자가진단을 통한 유지 보수 및 오류에 대한 정보를 사용자에게 알리고, 환자를 안전사고로부터 지켜줄 수 있도록 하여 의료기기에 대한 신뢰성을 높였으며 상용화의 가능성을 제시하였다.

감사의 글

본 연구는 2022년도 중소벤처기업부의 “지역특화산업 육성+(R&D)-지역스타기업육성(S3262797)” 지원을 받아 수행된 연구결과입니다.

참고문헌

1. Won Man Park, Yoon Hyuk Kim, “Analysis of Range-of-Motion in Continuous Passive Motion Rehabilitation”, The 2008 Fall Conference of Korean Society of Mechanical Engineers, Nov.05, pp.1515-1517, (2008).
2. Bouchard, C., Blair, S. N., Haskell, W. L., translated by Son, C. T., Shin, W. T., Lee, S. H., Physical Activity and Health, Daehan Media Publishing Company, Korea, (2011).
3. Gui-Hyung Lee, Yong-Jin Kim, Seok-Hyun Park, Hyo-Sung Lee, Hyun-A Cho, “A Study on the Rehabilitation Equipment for Knee Joint”, Journal of the Korean Society of Manufacturing Technology Engineers, vol. 20, no. 3, pp. 509-517, (2013).

4. 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, (2015.5).
 5. Ki-Hoon Park, Seong-Hun Park, Tae-Sung Yoon, Gun-Pyong Kwak, Ho-Kyun Ann, Seung-Kyu Park, "Development of Arm Motion Sensing System Using Potentiometer for Robot Arm Control", Journal of the Korea Institute Of Information and Communication Engineering, vol. 16, no. 4, pp. 872-878, (2012).
 6. 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).
 7. Mun-Suck Jang, Jae-Hong Shim, Enug-Hyuk Lee, Sang-Bang Choi, "Development of Motor, Encoder Evaluation System using High Performance DSP", Journal of the Semiconductor & Display Technology, vol. 8, no. 4, pp. 77-82, (2009).
 8. Sugimoto, H., Ichikawa, T., Hosoi, H., and Kawasakin, S., "Magnetic Pole Detection Method and Control of Brush DC Servomotor With Invermental Encoder", Trans. on JIEE, vol. 122-D, no. 9, pp. 899-909, (2002).
 9. Seung-Sub Shin, "Immediate Effects of Various Contract-Relax Techniques on the Peck Force and Range of Motion of Knee Extension", PNF and movement, vol. 16, no. 2, pp. 229-238, (2018).
 10. Hong-Yong Jung, Gu-Yeol Jeong, "A Study on Exercise Rehabilitation and Recovery of Shoulder Range of Motion(ROM) after Surgery in Clavicle Fracture Caused during the Exercise", Korean Journal of Sports Science, vol. 24, no. 5, pp. 1389-1399, (2015).
-
- 접수일: 2022년 12월 5일, 심사일: 2022년 12월 8일,
 게재확정일: 2022년 12월 13일