

<https://doi.org/10.7236/JIIBC.2021.21.2.89>
JIIBC 2021-2-13

체압센서를 장착한 욕창예방 의료용 침대의 제어기법

Control Technique of a Medical Bed for Ulcer Prevention Equipped with Body Pressure Sensors

선민주*, 최지영*, 이영대**

Minju Seon*, Jie-Young Choi*, Youngdae Lee**

요약 욕창은 아직 해결되지 않은 인류의 난제이다. 본 연구에서는 건반형 의료용 침대를 개발하고 체압센서를 장착하여 욕창이 임계압력에 이르지 않도록 건반을 제어하는 방법을 제시한다. 이를 위해 4bar 링크를 이용한 건반형 매트리스를 개발하고 건반의 높낮이를 체압센서를 통해 임계압력 이내로 제어하는 방법을 사용한다. 압력 \times 시간이 중요 요인인 욕창에서 건반을 승강하며 시간제어만을 할 때는 신체의 불편감이 있으나, 제시한 방법을 사용하면 압력을 임계압력 이내로 제어함으로써 편안한 상태에서 욕창을 예방하는 효과를 거둔다. 개발한 의료용 침대 시스템의 유효성과 타당성을 이론과 실험을 통해 검증하였다.

Abstract Pressure sores are an unresolved human challenge. In this study, a keyboard-type medical bed was developed and a body pressure sensor was installed to provide a method to control the keyboard so that the pressure sores do not reach the critical pressure. For this, a keyboard-type mattress using a 4bar link is developed, and a method of controlling the height adjustment of the keyboard within the critical pressure through a body pressure sensor is used. There is a feeling of discomfort in the body when the keyboard is raised and lowered from pressure sores, which is an important factor: pressure \times time, and only time control is performed, but if the proposed method is used, pressure is controlled within the critical pressure, thereby preventing bedsores in a comfortable state. The effectiveness and validity of the developed medical bed system were verified through theories and experiments.

Key Words : Smart Medical Bed, Body Pressure Sensor, Pressure Sensor Control, CAN, PI Control, IP Control

1. 서론

신체압력 \times 지속시간으로 표시되는 압력 욕창 (pressure ulcer)은 체압 임계치인 32mmHg를 초과하면 욕창이 진행되기 시작하고, 이 상태에서 장기간 경과

하면 욕창이 발생할 수 있다[1]. 주요 욕창 발생 부위는 그림 1과 같다. 많은 공압식 욕창방지 매트리스가 시판되고 있지만 잔류체압이 임계체압인 32mmHg를 초과하므로 완전한 욕창방지가 이뤄지지 못하고 있다. 단, 키보드형 침대의 경우 이론적으로 건반을 위아래

*정회원, (주)나인벨 헬스케어

**종신회원, (주)나인벨 연구소장

접수일자 2021년 3월 12일, 수정완료 2021년 4월 3일
게재확정일자 2021년 4월 9일

Received: 12 March, 2021 / Revised: 3 April, 2021 /

Accepted: 9 April, 2021

**Corresponding Author: ydlee@ninebell.co.kr
Research Director, Ninbell Co., Ltd, Korea

로 움직여 잔류체압을 방지할 수 있다. 즉, 건반을 아래로 이동시켜 체압을 0으로 낮추고 임계시간 이내로 키를 올려서 체압의 체류 시간을 조정한다. [2][3] 이 방식은 압력욕창의 지속시간 제어에 속한다. 이러한 원리로 공압실린더를 이용한 건반을 사용한 욕창예방침대도 시판되고 있으나 실린더의 움직임과 소음으로 인해 사용자가 숙면을 취하는데 어려움이 많다.

임상에서는 원칙적으로 2시간 이내에 자세를 변화시켜줘야 욕창 예방이 가능하고, 그 시간이 짧을수록 좋은 것으로 알려졌다. 건반이 장착된 전동 침대를 사용하여 10분마다 키를 번갈아 들어 올리는 것이 제안되었다. 이 제어 방식은 소음이 적고 체압 센서와 피드백 제어 시스템이 필요 없다는 장점이 있지만 키를 번갈아 들어 올릴 때는 편안함이 저하되고 키를 들어 올릴 때는 특정 부위에 걸리는 체압이 배가 된다는 단점이 있다.[1]

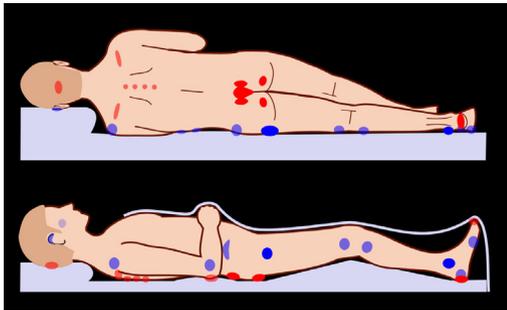


그림 1. 욕창 주요 발생 위치
Fig. 1. Areas of frequent pressure ulcer

본 연구에서 개발된 건반 링크 메카니즘은 의료용 침대에 적용하기 위하여 설계되었다[2][3]. 그림 2는 이 링크 메카니즘을 17개 장착한 건반 구조형 기구물로 욕창방지, 시트자동교환 및 환자이송을 위한 의료용 전동 침대이다[3].



그림 2. 개발된 의료용 침대의 외관
Fig. 2. The appearance of the developed medical bed

압력 욕창의 지속시간 제어 방식인 건반 교대 승강시 신체의 평안도를 해치는 문제를 해결하기 위해 본 연구에서는 욕창을 억제하기 위한 PI와 IP 제어를 제안하고 실험을 통해 제안된 접근법의 유효성을 검증한다. 개발된 시스템은 건반의 시간제어 방식인 교대 승강 방법과는 달리 사용자의 평안도를 해치지 않는 장점이 있다.

II. 개발된 시스템

1. 시스템 기술

그림 3과 같이 침대 매트리스는 N개의 건반으로 구성되며 각 건반은 4 bar 링크 메카니즘으로 이루어져 있다. 4 bar 링크는 역전 방지를 위해 오셋을 두었다.[3] 모터는 회전 각도로 입력을 받으며, 모터와 연결된 링크의 길이(r)에 따라 건반의 높이(h)이 정해진다. 동작시키고 싶은 높이를 아래의 수식에 대입하면 필요한 모터의 회전 각도를 구할 수 있다.

$$h = r(1 - \cos\theta) \quad (1)$$

$$\theta = \arccos(1 - \frac{h}{r}) \quad (2)$$

여기서 θ 는 건반 링크의 회전각도이고, r 은 건반링크의 회전반경, 그리고 h 는 건반의 높이이다.

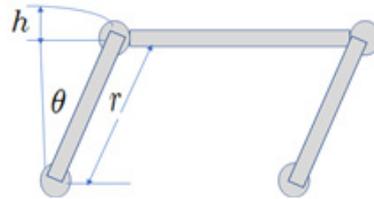


그림 3. 4bar 링크 메카니즘
Fig. 3. 4bar link mechanism

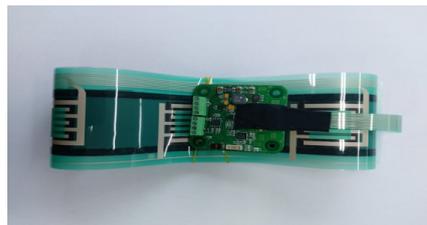


그림 5. 시험에 사용된 체압센서 및 제어기
Fig. 5. The body pressure and the controller for experiment

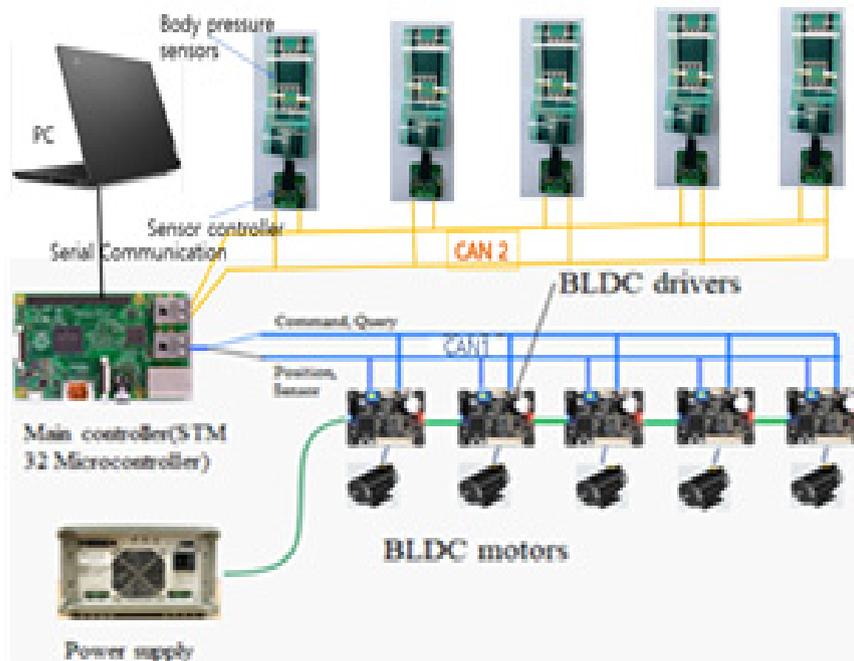


그림 4. 시스템 하드웨어 구성
 Fig. 4. The organization of system hardware

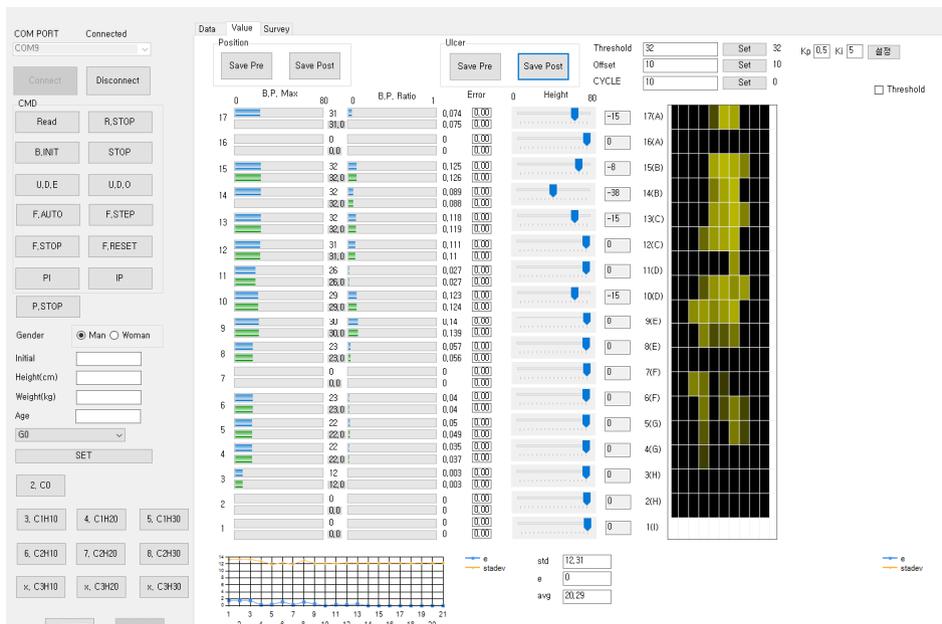


그림 6. PC 제어 프로그램의 GUI
 Fig. 6. PC Control Program GUI

그림 4는 개발한 시스템의 하드웨어 구성을 보여준다. 메인 제어기는 사용자 인터페이스 파트, 모션 컨트롤러 파트, 호스트 인터페이스 파트 등 여러 부분으로 나뉜다. 메인 제어기는 CAN통신을 통해 N개의 건반에 있는 N개의 모터 서보 드라이버와 N개의 체압 센서의 값을 전송하고 수신할 수 있다.

체압센서는 그림 5와 같은 FSR방식의 박막 체압 센서를 개발하여 사용하였다. 체압센서는 각 건반에 실장되며 M개의 센서들이 제어기에 연결된다. 그러면 N개의 센서제어기는 CAN통신을 통해 NM개의 센서값을 메인 제어기로 전송하며 NM이 클수록 체압지도의 해상도가 커진다. 그러나 N과 M은 물리적인 이유와 실용적인 이유로 제한이되며 본 연구에서는 N=17, M=10을 채용하였다. 체압센서는 사용전에 캘리브레이션되어 0~80mmHg의 체압값을 제어기로 전송한다.

메인제어기의 프로그램은 CubeMx로 하드웨어 설정을 하고 Cube IDE환경에서 C언어로 프로그램이 작성되었으며, PC는 Windows 10 운영체제 환경에서 Visual C#으로 프로그램이 작성되었다.

PC의 프로그램은 메인제어기로의 명령을 내리거나 메인제어기로부터 데이터를 받아서 시각화 및 엑셀로 데이터를 저장하는 부분을 담당하고 있다. 그림 6은 제작된 PC프로그램의 GUI를 보여준다.

III. 연구방법

1. PI 제어기와 IP 제어기

PI 제어기는 지령값과 측정값의 오차 및 오차의 적분값에 비례하는 출력을 발생한다. 반면에 IP제어기는 지령값과 측정값의 오차의 적분값과 측정값에 비례하는 출력을 발생한다. IP 제어기의 경우 전달함수에 영점이 존재하지 않으므로 오버슈트 및 안정화 시간 등을 원하는 특성이 되도록 제어이득을 설정하기가 용이하며, 동일한 크기의 오버슈트를 기준으로 할 때 PI 제어기보다 이득을 더 크게 할 수 있다[5]. 즉 대역폭을 크게 할 수 있어 외란에 대해 더 좋은 응답 특성을 갖게 된다.

그림 7은 PI 제어기의 블록도를 나타낸다. 건반의 이동량은 현재 체압과 임계 체압과의 차이에 대해 조정되는 것으로 모델링 할 수 있다.

시스템을 식 3과 같은 1차 시스템으로 가정하고 그림 7로부터 PI 제어기의 폐루프(Closed loop) 전달 함수로 표현하면 다음과 같다.

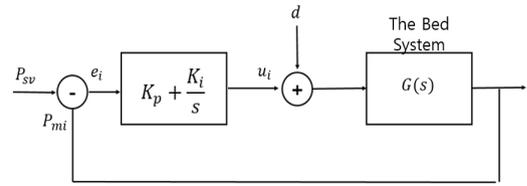


그림 7. PI 체압 제어기
Fig. 7. PI Body pressure controller

$$G(s) = \frac{b}{s + a} \quad (3)$$

$$G_{PI}(s) = \frac{p_{mi}}{p_{sv}} = \frac{b(k_p s + k_i)}{s^2 + (a + bk_p)s + bk_i} \quad (4)$$

식 (4)에서 PI 제어기의 경우 $s_z = -k_i/k_p$ 에 영점이 존재하고 있으며 이 영점의 영향으로 인해 오버슈트의 크기가 증가한다. PI 제어 시스템에서 이러한 영점에 의한 오버슈트 응답의 문제점은 IP 제어기를 사용하면 해결할 수 있다.

그림 8은 출력 체압을 제어하기 위한 IP 제어기 블록도이다. IP 제어기는 체압의 오차를 비례 제어하는 PI 제어기와는 달리 출력 체압에 대해 비례 제어를 한다.

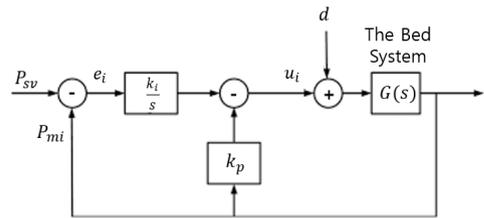


그림 8. IP 체압 제어기
Fig. 8. IP Body pressure controller

그림 8의 블록선도를 전달함수로 나타내면 식 (5)와 같다.

$$G_{IP}(s) = \frac{p_{mi}}{p_{sv}} = \frac{bk_i}{s^2 + (a + bk_p)s + bk_i} \quad (5)$$

식 (5)의 IP 제어기에서는 PI 제어기의 영점이 제거가 되어 오버슈트가 작도록 제어가 가능함을 알 수 있다.

2. 실험 방법

본 연구에서는 각 건반에 걸린 압력과 욕창 임계 압력

과의 에러를 조절하기 위해 PI제어기, IP제어기를 사용했다. 건반의 높이는 PI, IP제어기에 의해 제어된다.

그리고 각 건반에서의 최대 체압은 식 (5)에 의해 계산된다. 최대 체압값이 32mmHg가 넘으면 욕창발생 임계압력을 초과하게 되어 일정시간이 지속되면 실제 욕창이 발생하게 된다.

$$p_{mi} = \max_j p_{ij}, \quad j = 1, 2, \dots, M \quad (6)$$

그림 7과 8에서 PI 제어기 IP 제어기의 에러 e_i 는 다음과 같이 계산한다.

$$e_i = \min(p_{sv} - p_{mi}, 0), \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (7)$$

여기서 p_{sv} 는 목표 압력값, p_{mi} 는 건반 i 의 최대 압력, u_i 는 건반 입력이고 이때, 전체 에러는 다음과 같이 계산한다.

$$e_{RMS} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N e_i^2}{N}}, \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (8)$$

여기서 N 은 건반수이다.

침대 시스템에서 건반의 높이를 조절하며, 변화된 높이에 대해 체압값의 변동이 발생할 때의 e_{RMS} 의 특성을 비교 검토하였다.

IV. 실험결과

실험은 PI제어기, IP제어기를 사용하여 건반의 높낮이를 조절하고 각 건반에 걸린 에러를 제거하여, 전체 에러가 0에 수렴하게 하는 것이 실험 목표이다. 건반을 하강 시킬수록 해당 건반에 걸리는 체압도 같이 낮아지는 특성이 있지만, 급격히 건반이 하강할 경우 환자에게 무리가 갈 수 있으므로 주변 건반과의 높이차를 줄이는 방향으로 높이 조절이 되어야 한다. 본 실험에서는 단계적으로 건반이 하강하고, 최소한의 움직임으로 전체 에러가 0이 되는 것을 비교 검토하였다.

건반이 내려가는 시간과 내려간 후 체압이 안정되는 시간을 고려하여 제어기 타이머 주기는 5sec로 정하였으며, 실험에 사용한 파라미터 값은 아래 표 1과 같다.

표 1. PI 제어기 실험 파라미터

Table 1. PI Controller Experimental Parameters

K_p	K_i	$P_{sv}(\text{mmHg})$
0.5	0	32
0.5	1	32

표 2. IP 제어기 실험 파라미터

Table 2. IP Controller Experimental Parameters

K_p	K_i	$P_{sv}(\text{mmHg})$
0.3	0.3	32
0.3	1.2	32

1. PI 제어기 실험

PI 제어기 실험은 체압센서를 장착한 의료용 침대에서 175cm, 88kg의 성인남자를 대상으로 바로 누운 자세에 대해 체압 제어를 시험하였다. 비례항만 갖는 경우(P제어)와 비례-적분항을 갖는 경우(PI제어)로 나누어서 실험하였다. 아래 그림 9에서 보는 것과 같이 I제어를 하는 경우의 PI제어가 잔류 편차를 줄여주고 있기 때문에 더 빠르게 전체 에러가 0으로 수렴하는 것을 볼 수 있다.

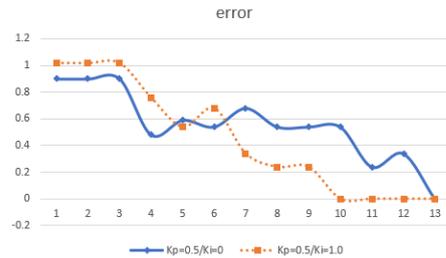


그림 9. PI 제어기 실험 결과

Fig. 9. PI Controller Experimental Result

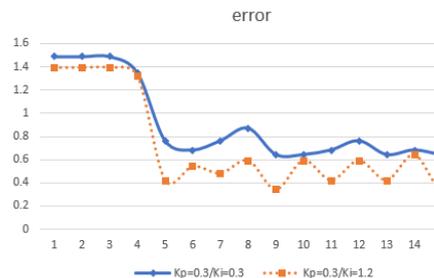


그림 10. IP 제어기 실험 결과

Fig. 10. IP Controller Experimental Result

PI 제어기는 욕창 임계 압력값과의 오차를 비례제어하므로 0으로 수렴하는 시간이 빠르다. IP 제어는 안정적으로 0으로 수렴해가지만 더디고, 그동안 건반이 계속 진동하는 상태이기 때문에 환자가 편안함을 느끼지 못할 가능성이 있음을 관찰하였다.

표 3. PI 제어기 실험 결과

Table 3. PI Controller Experimental Result

건반 번호	제어 전 에러 (mmHg)	제어 전 최대체압 (mmHg)	제어 후 에러 (mmHg)	제어 후 최대체압 (mmHg)	건반높이 (mm)
1	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0
3	0	13	0	14	0
4	0	0	0	5	0
5	0	17	0	15	0
6	-5	37	0	20	-4
7	0	0	0	0	0
8	0	0	0	4	0
9	0	28	0	16	0
10	-5	37	0	21	-3
11	0	0	0	0	0
12	0	20	0	16	0
13	0	23	0	14	0
14	-7	39	0	21	-18
15	-5	37	0	20	-5
16	0	0	0	0	0
17	-2	34	0	17	-14

V. 결 론

본 연구에서는 4 bar링크로 구성된 침대 매트리스에 체압센서를 각 건반에 장착한 의료용 침대에서 욕창 예방을 위하여 PI 제어와 IP 제어 기법을 실험하였다. 이를 위해 체압센서를 통하여 신체의 체압을 측정하고 피드백 제어하고 체압을 임계압력 이내로 제어하는 방식을 최초로 제안하고 개발하였다..

실험을 통하여 PI 제어기와 IP 제어기의 0으로 수렴하기까지 건반의 동작 횟수를 비교 검토함으로써 욕창 제거를 위한 침대에서는 PI제어기가 압력 제어 속도나 건반의 이동량에서 유리함을 실험을 통하여 관찰하였다.

인체 플랜트의 전달함수 특징은 정확히 알려진 바는 없지만 개발된 의료용 침대에서 PI제어와 IP제어를 통한 체압제어가 가능함을 확인할 수 있었고 욕창의 임계체압

(32mmHg)이하로 조절이 가능함을 알았다.

이 방식은 일반적으로 욕창매트리스나 공압실린더 제어 방식에서 많이 사용하는 건반의 교대 승강 방법과는 달리 사용자의 편안도를 해치지 않고 체압을 분산 제어하는 장점이 있다.

References

- [1] Y.D.Lee, C.Y.Kim, C.J.Chang, M.S.Choi, J.A.Kim and J.Y.Lim, "The Control System of a Medical Robot Bed for Preventing Ulcer", J. of the Convergence on Culture Technology, vol.6, No.3, pp353-359, Aug.31,2020.
- [2] J.A.Kim, Y.D.Lee, H.K.Cho, "The Control System of a Robot Bed for Caring Pressure Ulcer", Int. J. of Advanced Culture Techonology. Vol.8, No.3, pp. 253-258, Aug.3.2020. DOI <https://doi.org/10.1703/IJACT.2020.8.3.253>
- [3] Y.D.Lee, C.Y.Kim and M.S.Choi, "Enhancement of 4 Bar Parallelogram Linkage for a Medical Bed", J. of the Convergence on Culture Technology, vol.6, no.1, pp.515-520, Feb.29,2020.
- [4] Y.D. Lee, M.S. Choi, I.H. Jang, C.Y. Kim, D.S.Choi, M.S. Kim, W.J. Kim and D.H. Kim, "Research on the Development of Automated Multifunction Integrated Motion Bed", J. of theConvergence on Culture Technology, vol.18, no.5,pp.215-222, Oct.31, 2018.
- [5] Ahmed F.I, El-Tobshy A.M. "P-I AND I-P controllers in a closed loop for DC motor devices", Power Conversion Conference, Vol. 2, pp. 613-618, 1997.
- [6] H.W. Kim, H.W. Kim, K.Y. Cho, J.K. Ji "IP Voltage Controller of Three-phase PWM Converter for Power Supply of Communication System", Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society, Vol. 12, No. 6 pp. 2722-2728, 2911

저 자 소 개

선 민 주(정회원)



- 2015년 2월 : 한경대학교 정보제어공학
학과 졸업(공학사)
- 2015년 6월 ~ 2016년 10월 : (주)
PROTEC 연구원
- 2020년 12월 ~ 현재 : (주)나인벨 헬
스케어 연구원

- 관심분야 : 모션제어, 영상제어, 지능로봇, 공장 자동화

최 지 영(정회원)

- 2020년 9월~현재:(주)나인벨헬스케어 대표

이 영 대(중신회원)

- (주)나인벨 연구소장
- (사)한국인터넷방송통신학회논문지 (JIIBC) 18권 5호 참조
- 관심분야 : 지능로봇, 의료IT, 임베디드시스템

※ 본 논문은 중소벤처부의 2020 기술개발 프로그램(S2926521)에 의해 수행되었습니다. This work was supported by the 2020 Technology Development Program (S2926521) funded by the Ministry of SMEs and Startups of Korea.