

교각 시공을 위한 모바일 매니퓰레이션 시스템 개발 Development of a Mobile Manipulation System for Pier Construction

김효곤* · 김종찬** · 황정환*** · 박정우**** · 박지현** · 서진호***** · 최영호*†
Hyo-Gon Kim*, Jong-Chan Kim**, Jeong-Hwan Hwang***, Jeong-Woo Park****,
Ji-Hyun Park**, Jin-Ho Suh***** and Young-Ho Choi*†

(Received 15 November 2021, Revision received 22 November 2021, Accepted 23 November 2021)

Abstract : A pier is a structure that supports the bridge girder as the lower structure of the bridge. Concrete piers are generally constructed by connecting rebars, installing formwork and then pouring concrete. Pier construction is performed by repeating rebar connection work, formwork installation work, concrete pouring work, formwork dismantling work and formwork installation work. Such pier construction requires work at height and falls frequently occur during the operation of the above procedures. An automation system is being developed to reduce the risk of accidents, shorten the construction period and improve the quality of the pier construction work; automation is being attempted to some of the pier construction tasks. Most of the pier construction work, however, is still performed by workers and these tasks are not easy to automate. This paper proposes a mobile manipulation system that can support rebar structure connection work, concrete pouring and concrete vibrating work in pier construction work. We developed a prototype of the proposed system and verified its applicability through driving experiments.

Key Words : Pier construction, Construction Robot, Mobile manipulation

*† 최영호(ORCID:<https://orcid.org/0000-0003-1576-8277>) :
수석연구원, 한국로봇융합연구원
E-mail : rockboy@kiro.re.kr, Tel : 054-279-0432
*김효곤(ORCID:<https://orcid.org/0000-0002-4765-6117>) :
책임연구원, 한국로봇융합연구원
**김종찬(ORCID:<https://orcid.org/0000-0002-1538-7370>) :
주임연구원, 한국로봇융합연구원
***황정환(ORCID:<https://orcid.org/0000-0003-3499-8908>) :
주임기술원, 한국로봇융합연구원
****박정우(ORCID:<https://orcid.org/0000-0002-5590-6788>) :
선임연구원, 한국로봇융합연구원
**박지현(ORCID:<https://orcid.org/0000-0001-6856-9912>) :
주임연구원, 한국로봇융합연구원
*****서진호(ORCID:<https://orcid.org/0000-0002-8673-4528>) :
교수, 부경대학교 기계시스템공학과

*† Young-Ho Choi(ORCID:<https://orcid.org/0000-0003-1576-8277>) :
Chief Researcher, KIRO.
E-mail : rockboy@kiro.re.kr, Tel : 054-279-0432
*Hyo-Gon Kim(ORCID:<https://orcid.org/0000-0002-4765-6117>):
Principal Researcher, KIRO.
**Jong-Chan Kim(ORCID:<https://orcid.org/0000-0002-1538-7370>) :
Assistant Researcher, KIRO.
***Jeong-Hwan Hwang(ORCID:<https://orcid.org/0000-0003-3499-8908>) :
Research Specialist, KIRO.
****Jeong-Woo Park(ORCID:<https://orcid.org/0000-0002-5590-6788>) :
Senior Researcher, KIRO.
**Ji-Hyun Park(ORCID:<https://orcid.org/0000-0001-6856-9912>) :
Assistant Researcher, KIRO.
*****Jin-Ho Suh(ORCID:<https://orcid.org/0000-0002-8673-4528>) :
Professor, Department of Mechanical System Engineering,
Pukyong National University.

1. 서 론

건설 관련 자동화 시스템은 시공 안정성과 생산성, 효율성 향상을 위해 세계적으로 개발되고 있다. 예를 들어 건축물 검사로봇, 배관 건설 로봇, 건설 3D프린팅, 수중건설 로봇에 이르기까지 다양한 건설 분야에서 개발되고 있다.¹⁻⁴⁾

특히 교량 건설은 많은 고소 작업으로 인해 작업의 안정성과 효율성 개선이 요구되나 자동화가 쉽지 않은 건설 분야이다. 일반적으로 교량은 거더와 교각으로 이루어진다. 거더는 교량의 상부 구조물을 뜻하며 교각은 교량의 하부 구조로 거더를 지지하고 교량의 하중을 하방으로 전달하는 구조물이다. 콘크리트 교각은 일반적으로 철근을 연결하고 거푸집을 설치한 후 콘크리트를 타설하여 시공한다. 한 번에 타설할 수 있는 높이는 제한적이므로 교각의 하단부터 상단까지 철근 연결, 거푸집 설치, 콘크리트 타설, 거푸집 해체, 거푸집 설치 작업을 반복하며 교각을 시공한다. 이러한 교각 시공은 고소 작업이 요구되며 작업 중 추락 사고가 빈번하게 발생하고 있다.

교각 시공 작업 역시 위험성을 줄이고 공기단축 및 품질향상을 위한 자동화 시스템이 개발되고 있으며 교각 시공의 일부 작업에서 자동화가 적용되고 있다. 예를 들어 거푸집을 자동으로 해체하고 상승시키는 자동 상승 거푸집 시스템이 개발 되었으며 이 시스템은 작업자가 높은 위치에서 거푸집을 해체하고 다시 설치하는 위험한 작업을 대신한다.^{5,6)} 그러나 철근 구조물 연결 작업, 콘크리트 타설, 콘크리트 바이브레이팅과 같은 대부분의 교각 시공 공정을 여전히 작업자가 수행하고 있으며 이 공정들은 자동화가 쉽지 않은 작업들이다.

본 연구에서는 자동 상승 거푸집 시스템에 설치하여 철근 구조물 연결 작업, 콘크리트 타설, 콘크리트 바이브레이팅 작업을 지원할 수 있는 모바일 매니플레이션 시스템을 제안한다. 먼저, 교각 시공에 매니플레이션 시스템의 적용을 위한 시나리오를 정의한다. 그리고 시나리오를 만족하기 위한 모바일 매니플레이션 시스템의 설계에

대하여 기술한다. 다음으로 시스템의 제어 방법에 대해 기술하고 제안하는 시스템의 프로토타입에 대한 실험으로 가능성을 검증한다.

2. 교각 시공용 모바일 시스템 설계

2.1 교각 시공 지원 시스템 시나리오 정의

본 연구에서 제안하는 교각 시공을 위한 모바일 매니플레이션 시스템의 개념도는 Fig. 1과 같다. 자동 상승 거푸집 시스템의 상단에 레일을 설치하고 그 레일을 따라 이동할 수 있는 모바일 플랫폼과 매니플레이터로 구성되어 있다.

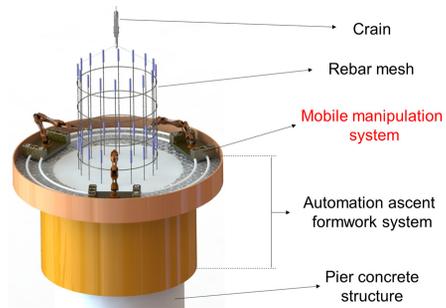


Fig. 1 Concept design of robot system for pier construction

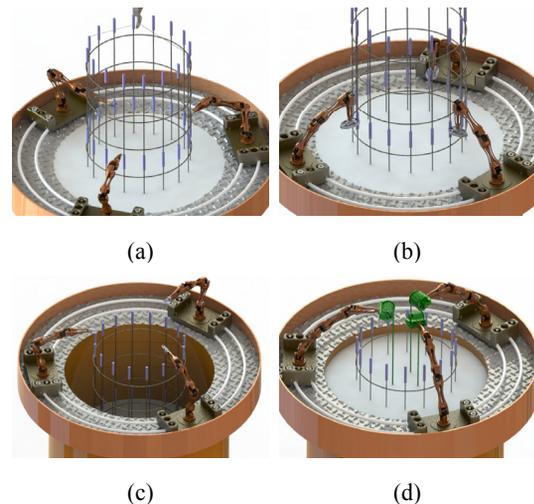


Fig. 2 Working procedure of mobile manipulation system for pier construction

모바일 매니플레이션 시스템은 3세트로 구성되어 협업을 통해 교각 시공 작업을 한다. 목표로 하는 교각 시공 작업은 철근망 잡기 및 연결 작업, 커플러 압착작업, 콘크리트 바이브레이팅 작업이다.⁶⁾ Fig. 2는 제안하는 모바일 매니플레이션 시스템의 교각 시공을 위한 작업 절차를 보여준다. Fig. 2(a)는 철근망 잡기 및 연결 작업을 보여준다. 크레인이 철근망을 기존 설치된 철근망에 대략적으로 이동시키면 3대의 모바일 매니플레이션 시스템으로 철근망의 위치를 정밀하게 이동시키고 크레인이 철근망을 내려 각각의 철근들이 기존 철근망에 장착되어있는 커플러들에 안착시키는 절차로 진행된다. 다음으로 모바일 매니플레이션 시스템은 철근 커플러 압착기틀을 이용하여 커플러들을 압착시켜 철근망 연결을 마무리한다(Fig. 2(b)). 그리고 설치된 철근망의 높이까지 자동 상승 거푸집 시스템을 상승시키고 상승된 거푸집에 콘크리트를 타설한다(Fig. 2(c)). 다음으로 모바일 매니플레이션 시스템은 콘크리트 바이브레이터 틀을 이용하여 타설된 콘크리트 내에 발생된 기포들을 제거한다(Fig. 2(d)). 콘크리트 양생 후 작업 절차를 반복하며 교각 건설을 진행한다.⁶⁾

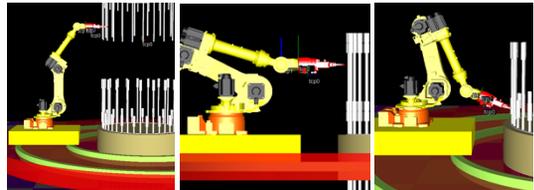
2.2 매니플레이터 선정

목표로 하는 교각 기둥의 지름은 2m이고 모바일 매니플레이션 시스템에 장착되는 틀은 최대 40 kg이다. 이러한 작업영역 및 허용하중을 만족하는 매니플레이터를 선정하였다. 선정된 매니플레이터는 Table 1과 같다. 선정된 매니플레이터의 워크스페이스가 교각 시공 작업 시나리오의 작업영역을 만족하는 것을 확인하고 레일의 직경과 레일이 부착되는 작업대의 크기를 결정하기 위해

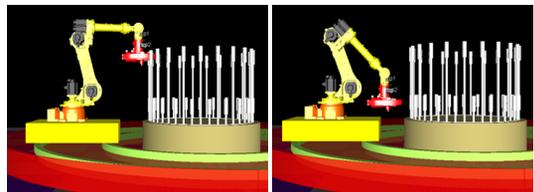
Fig. 3과 같이 동작 시뮬레이션을 수행하였다. 지름 2 m의 기둥 바깥으로 두 세트의 레일을 설치하고 이동플랫폼에 해당하는 블럭 위에 매니플레이터를 결합하였다. 시뮬레이션을 통해 교각 시공 작업 시나리오의 철근망 잡고 연결하기, 커플러 압착, 콘크리트 바이브레이팅 작업에 대한 매니플레이터의 작업 영역을 확인하였다.

Table 1 Manipulators selected for pier construction

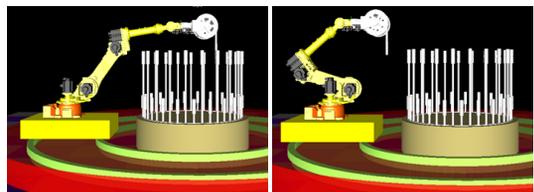
Manufacturer	Hyundai Robotics
Model	YS080
DOF	6 axis
Payload	80 kg
Body weight	645 kg



(a) Moving the rebar mesh



(b) Crimping coupler



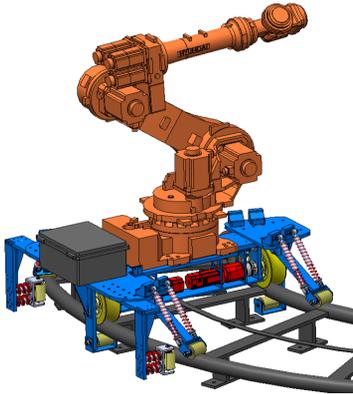
(c) Vibration concrete

Fig. 3 Pier construction work simulation of mobile manipulation system

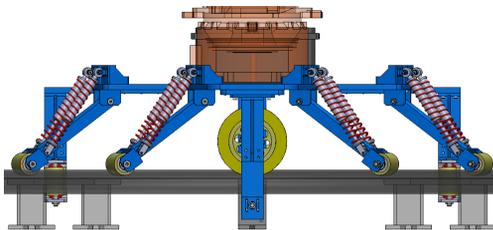
2.3 모바일 플랫폼 설계

모바일 매니플레이션 시스템은 레일에 떨어진 콘크리트나 작업 잔재물을 극복하며 이동이 가능해야하고 작업 중에 전복을 방지할 수 있는 구조로 설계되어야 한다. Fig. 4는 본 연구에서 제안하는 교각 시공을 위한 모바일 매니플레이션 시스템의 3D 모델이다. 모바일 플랫폼과 매니플레이터가 결합된 형태로 구성된다. 모바일 플랫폼은 레일에 떨어진 건축 작업 잔재물을 넘어갈 시 구동 휠이 항상 레일에 밀착될 수 있고 매니플레이션 작업중 무게 중심 이동에 따른 전복을 방지하

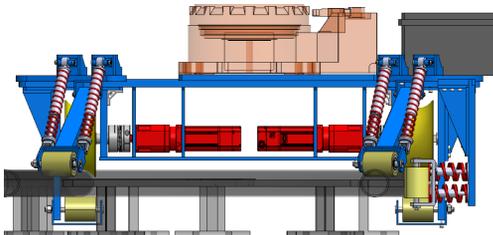
는 구조로 설계하였다. Fig. 4(b)와 같이 2개의 구동 휠이 플랫폼의 가운데 위치하고 시스템이 측면 방향으로 넘어가지 않게 4개의 스프링 댐퍼가 결합된 메커니즘으로 구현하였다. Fig. 4(c)에서 모바일 매니플레이션의 전복 및 이탈을 방지하기 위해 레일 하단 및 측면에 설치된 보조 휠을 확인할 수 있다.



(a) Full model



(b) Front view of the mobile platform



(c) Side view of the mobile platform

Fig. 4 3D model for the mobile manipulation system for pier construction

Fig. 5는 스프링 댐퍼 메커니즘의 개념도이다. 스프링에 의한 토크(T_{spring}) 및 댐퍼에 의한 토크(T_{damper})는 식 (1)에 의해 구할 수 있다. 여기서 K 는 스프링 계수, Δh 는 스프링의 압축 변위, F_{spring} 은 스프링력, B 는 댐핑 계수이다.

$$\begin{aligned}
 a &= \sqrt{l_1^2 + l_2^2} \\
 b &= \sqrt{l_3^2 + l_4^2} \\
 \alpha_1 &= \tan^{-1}\left(\frac{l_4}{l_3}\right) \\
 \alpha_2 &= \tan^{-1}\left(\frac{l_2}{l_1}\right) \\
 d &= \sqrt{a^2 + b^2 - 2ab \cos(\pi - \alpha_1 - \alpha_2 - \theta)} \\
 r &= b \sin \cos^{-1}\left(\frac{b^2 + d^2 - a^2}{2bd}\right) + \left(\cos^{-1} \frac{\sqrt{d^2 - f^2}}{d}\right) \\
 F_{spring} &= K \Delta h \\
 T_{spring} &= r \cdot F_{spring} \\
 T_{damper} &= r \cdot B \dot{d}
 \end{aligned} \tag{1}$$

매니플레이션의 운동으로 관절 J_1 에서 생성되는 토크에 대응하는 T_{spring} 및 T_{damper} 를 발생시키기 위해, 스프링 계수 및 댐핑 계수를 식 (1)에서 도출하여 스프링 및 댐퍼를 선정하였다.

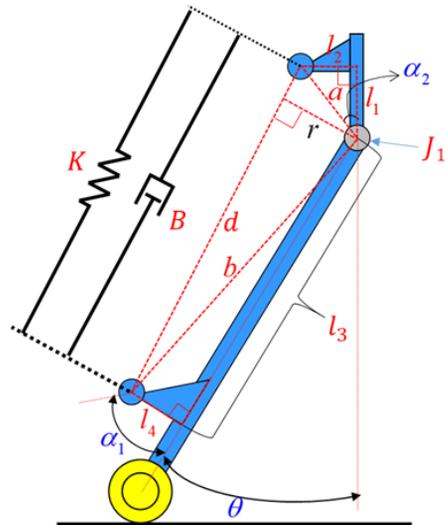


Fig. 5 Simple model and geometric parameters for the spring-damper mechanism

3. 교각 시공용 모바일 시스템 제어

모바일 플랫폼은 매니플레이터를 고려하여 부하 중량 1톤을 극복하며 구동되어야 한다. 본 연구에서는 고하중의 모바일 매니플레이션 시스템을 위치 제어하기 위해 모바일 플랫폼에 적용된 모터의 최고 속도 및 가속도 사양을 고려한 위치 프로파일을 생성하였다. 식 (2)는 목표위치와 현재 위치가 고려된 사다리꼴 속도 프로파일을 생성한다.

$$\begin{aligned}
 & \text{when } (P_{target} \geq P_{ref(i-1)}) \\
 & v_{ref(i)} = \min \left[\begin{array}{c} v_{ref(i-1)} + a\Delta t \\ v_{max} \\ \sqrt{2a(P_{target} - P_{ref(i-1)})} \end{array} \right] \\
 & \text{when } (P_{target} < P_{ref(i-1)}) \\
 & v_{ref(i)} = \max \left[\begin{array}{c} v_{ref(i-1)} - a\Delta t \\ -v_{max} \\ \sqrt{2a(P_{target} - P_{ref(i-1)})} \end{array} \right] \quad (2)
 \end{aligned}$$

여기서 P_{target} 은 최종 목표 위치, P_{ref} 는 기준 위치, v_{ref} 는 기준 속도, v_{max} 는 최고 속도, a 는 최고 가속도, Δt 는 샘플링 시간, 아래첨자 (i)는 현재값, ($i-1$)은 이전값을 나타낸다.

위치 프로파일은 식 (3)으로 생성할 수 있다.

$$P_{ref(i)} = P_{ref(i-1)} + v_{ref(i)} \cdot \Delta t \quad (3)$$

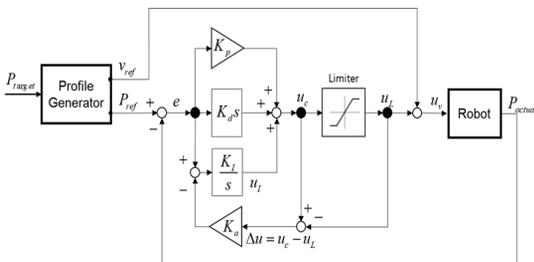


Fig. 6 Block diagram of the position control for the mobile manipulation system

생성한 위치 프로파일 및 속도 프로파일을 적용한 모바일 플랫폼의 위치 제어 알고리즘은 Fig. 6과 같다. 기본적으로 속도 프로파일이 로봇의 속도 제어 입력으로 들어가고 Anti-windup이 적용된 PID 컨트롤러를 통해 위치 오차를 보상하는 구조로 제어를 구성하였다.

4. 실험

교각 시공을 위한 모바일 매니플레이션 시스템의 프로토타입을 Fig. 7과 같이 제작하였다. 모바일 플랫폼의 제어 알고리즘 및 매니플레이터의 구동 소프트웨어를 PC에 탑재하여 모바일 매니플레이션 시스템의 제어 기능을 구현하였다. 모바일 플랫폼의 성능을 확인하기 위해 매니플레이터를 분리 후 1톤 부하를 결합하여 구동 실험을 수행하였다.



Fig. 7 Prototype of the mobile manipulation system for pier construction



Fig. 8 Experiment with mobile platform control algorithm application

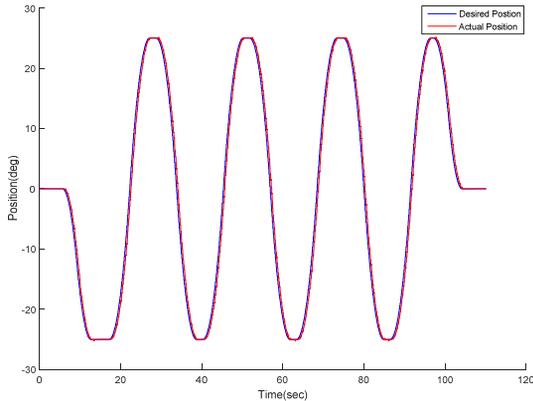


Fig. 9 Experiment result (blue solid line: Desired Position, red solid line: Actual Position)

모바일 플랫폼 모터의 최고 속도를 3,000 RPM으로 설정하고 Fig. 8과 같이 레일 위의 두 지점에서 왕복 구동을 4회 실시하는 테스트를 수행하였다. 레일 위의 두 위치는 휠의 회전 위치로 변환되고 프로파일 생성기를 통해 부드러운 위치 궤적이 실시간으로 생성된다. Fig. 9는 실험 결과에 대한 그래프이다. 파란색 실선이 생성된 위치 궤적이고 빨간색 실선이 위치 추종 제어기에 의해 구동된 모바일 플랫폼의 실제 위치에 해당한다. 레일 위의 -25° 지점에서 25° 지점 간에 부드러운 위치 프로파일이 생성된 것을 확인할 수 있고 1톤의 중량물을 탑재했음에도 위치를 잘 추종함을 확인할 수 있다. 그리고 구동 중에 레일을 이탈하지 않고 정지 및 구동 시작 시점에도 플랫폼이 기울어지지 않는 안정성을 확인하였다.

5. 결 론

본 연구에서는 자동 상승 거푸집 시스템에 설치하여 철근 구조물 연결 작업, 콘크리트 타설, 콘크리트 바이브레이팅 작업을 지원할 수 있는 모바일 매니플레이션 시스템을 제안하였다. 먼저 교각 시공에 매니플레이션 시스템의 적용을 위한 시나리오를 정의하고 시나리오를 만족하기 위한 모바일 매니플레이션 시스템의 설계에 대해 기술하였다. 그리고 교각 시공 시 수반되는 고중량물

에 대한 부하를 극복할 수 있는 제어 방법을 제안하였고 프로토타입을 제작하여 제어 알고리즘을 적용하였다. 1톤의 부하를 추가하여 프로토타입의 구동 테스트를 수행한 결과, 우수한 위치 추종성과 구동 안정성을 확인하였다.

향후 다중 모바일 매니플레이션의 협업 제어에 대해 실험할 예정이다.

후 기

이 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원이 시행하고 한국도로공사가 총괄하는 “스마트건설 기술개발 국가R&D사업(과제번호 21SMIP-A158708-02)”의 지원으로 수행하였습니다.

Author contributions

H. G. Kim; Writing-original draft. J. C. Kim; Software. J. H. Hwang; Hardware. J. W. Park; Resources. J. H. Park; Software. Y. H. Choi; Conceptualization. J. H. Suh; Writing-review & editing.

References

1. S. P. Kang, C. S. Han, M. S. Kang, S. H. Lee, and S. H. Moon, 2013, "Communication system design for the Robotic Building Maintenance System", In Proceedings of Korean Society for Precision Engineering, Spring Conference, pp. 209-210.
2. M. S. Jeong, J. Lee, S. H. Hong, M. Jang, D. Shin, J. Hahm and J. H. Seo, 2021, "Development of the Pipe Construction Robot for Rehabilitation Work Process of the Water Pipe Lines" The Journal of Korea Robotics Society, Vol. 16, No. 3, pp. 223-231. (DOI:10.7746/jkros.2021.16.3.223)
3. C. S. Back, J. H. Seo, J. S. Cho, J. W. Ahn and K. H. Cho, 2018, "3D Printed Building Technology using Recycling Materials", Journal

- of the Korean Institute of Resources Recycling, Vol. 27, No. 1, pp. 3-13.
(DOI:10.7844/kirr.2018.27.1.3)
4. J. W. Lee, J. W. Park, J. H. Suh, and Y. H. Choi, 2015, "Redundant Architectural Design of Hydraulic Control System for Reliability Improvement of Underwater Construction Robot", Journal of Ocean Engineering and Technology, Vol. 29, No. 5, pp. 380-385.
(DOI:10.5574/KSOE.2015.29.5.380)
5. H. Yoon, W. J. Chin, H. S. Kim, and Y. J. Kim, 2013, "Development of an Efficient Tapered Slip-Form System Applying BIM Technology", Engineering, Vol. 5, No. 9, pp. 693-699.
(DOI:10.4236/eng.2013.59082)
6. T. Chung, S. W. Lee, S. Y. Lee and J. H. Ryu, 2021, "Design of Manipulator End Effectors for Pier Column Construction", The Journal of Korea Robotics Society, Vol. 16, No. 3, pp. 207-215.
(DOI:10.7746/jkros.2021.16.3.207)