

# 구난 로봇용 양팔 매니퓰레이터 진동 해석 및 설계

## Analysis and Design of the Dual Arm Manipulator for Rescue Robot

박 동 일<sup>+</sup>, 박 찬 훈<sup>1</sup>, 김 두 형<sup>1</sup>, 경 진 호<sup>1</sup>

Dong Il Park<sup>+</sup>, Chanhun Park<sup>1</sup>, Doohyung Kim<sup>1</sup>, Jinho Kyung<sup>1</sup>

**Abstract** Dual arm manipulators have been developed for the entertainment purpose such as humanoid type or the industrial application such as automatic assembly. Nowadays, there are some issues for applying the dual arm robot system into the various fields. Especially, robots can substitute human and perform the dangerous activity such as search and rescue in the battle field or disaster. In the paper, the dual arm manipulator which can be adapted to the rescue robot with the mobile platform was developed. The kinematic design was proposed for the rescue activity and the required specification was determined through the kinematic analysis and the dynamic analysis in the various conditions. The proposed dual arm manipulator was manufactured based on the vibration analysis result and its performance was proved by the experiment.

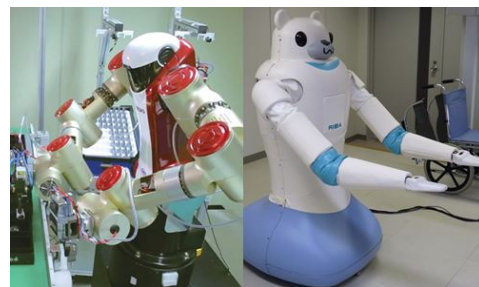
**Keywords** Dual arm manipulator, Dual arm robot, Rescue robot, Dynamic simulation

### 1. 서 론

병원이나 공공시설 등에서 노약자, 환자 등을 이송하거나 이동을 지원하기 위하여 양팔 매니퓰레이터를 탑재한 로봇에 대한 관심이 높아지고 있으며, 더불어 국가재난, 국방, 사회안전 등 전반적으로 인명을 구조하는 로봇 기술 역시 재난 안전 분야에서 주요 이슈가 되고 있다. 특히 전쟁과 같은 위험 환경에서 사람이 직접 투입되어 임무를 수행하기 어려운 환경에서 위험물을 이송하거나 부상병을 구난하는 로봇에 대한 관심이 높아지고 있다.

기존의 양팔 매니퓰레이터는 Fig. 1에 나타난 바와 같이 주로 휴머노이드에서 인간과 유사한 동작을 구현하기 위한

연구에서 시작하여, 산업현장 등에서 사람의 양팔 작업을 대신하기 위한 목적 등으로 연구 개발이 진행되어 왔다<sup>[1-3]</sup>. 앞서 언급한 바와 같이 점차 병원, 공공시설 등에서 전문적인 역할을 수행할 수 있는 양팔 매니퓰레이터에 대한 연구도 수행되고 있다<sup>[4,6]</sup>. 또한 기존에는 로봇이 사람과 분리되어 단독으로 작업하였으나, 점차 사람과 공간을 공유하거나, 사람과의 접촉, 협력 환경으로 발전하면서 로봇의 안전 메커니즘에 대한 연구도 다수 수행되어 왔다<sup>[7-12]</sup>.



(a) AMIRO (industry) (b) RIBA (hospital)

Fig. 1. Previous dual arm manipulators for indoor environments

Received : Oct. 27. 2016; Revised : Nov. 4. 2016; Accepted : Nov. 9. 2016

※This paper was supported by Civil-Military Technology Cooperation Program.

<sup>+</sup>Corresponding author: Department of Robotics and Mechatronics, Korea Institute of Machinery & Materials, Gajeongbukro 156, Yuseong-gu, Daejeon (parkstar@kimm.re.kr)

<sup>1</sup>Korea Institute of Machinery & Materials (chpark@kimm.re.kr, kdh649@kimm.re.kr, jhkyung@kimm.re.kr)

본 연구에서는 실내 환경이 아닌 협지가 포함된 실외 환경에서 인명 구난 작업을 수행하는 구난 로봇에 탑재될 양팔 매니퓰레이터에 대한 연구를 수행하고자 한다. 구난 작업을 위한 기구학적 구조 설계를 진행하고, 협지 주행 및 고속 주행이 가능한 모바일 플랫폼에서 안정적으로 운용되기 위해 모바일 플랫폼 기반의 진동 해석을 수행하였다. 정동적 해석을 바탕으로 구동 모듈을 제안하고, 제안된 구동모듈을 활용하여 10자유도의 양팔 매니퓰레이터를 개발하고, 구난작업을 위한 성능 검증을 수행하였다.

## 2. 구난 로봇 개념 설계

기존에 개발된 바 있는 전기식 모터를 이용한 양팔 매니퓰레이터의 경우, 가반하중은 팔당 0.5 kg에서 약 20 kg 수준이다. 고속, 고정밀 작업을 수행하는 산업용 로봇도 일반적으로 전기식 양팔 매니퓰레이터이며, 가반하중 약 10 kg 수준 정도까지 개발되어 활용되고 있다. 본 연구에서는 필드환경에서 인명을 구난하기 위한 목적으로 하는 양팔 매니퓰레이터를 개발하고자 한다. 이를 위하여 한 팔당 수십 kg급 수준의 가반하중이 필요하며, 아직까지 가반하중 수십 kg 이상의 전기식 고가반 하중 양팔 매니퓰레이터는 개발된 사례가 없다. 필드용 유압식 양팔 매니퓰레이터의 경우는 연구가 시도된 적은 있으나, 시스템 경량화 등의 어려움으로 연구가 지속되지 않은 바 있다.

본 연구에서는 전기식 고가반하중 양팔 매니퓰레이터의 실활용을 위해서 인명 구난 작업에 최적화될 수 있는 로봇의 형상을 구현하였다. Fig. 2에 나타난 구난 작업을 위해서는 양팔 매니퓰레이터는 각각 몸체의 왼편, 오른편에 대칭으로 부착되도록 고안되며, 상박에는 전후 회전을 위한 자유도, 좌우 회전을 위한 자유도, 전후 수평 유지를 위한 자유도가 고려되었다. 또한 하박에는 좌우 수평 유지를 위한 자유도가 필요하고, 말단부의 구난 작업을 지원할 수 있는 자유도가 추가로 고려되어 팔당 5자유도의 구조를 제안하였다. 제안된 양팔 매니퓰레이터의 구조는 Fig. 3에 나타난 바와 같다.

Fig. 4와 같이 한 팔당 5자유도를 가지는 기구학적 기본 형상이 결정되었으며, 이와 같은 기본 구조를 바탕으로 다음 장에서 정동적 시뮬레이션을 수행함으로써, 대략적인 필

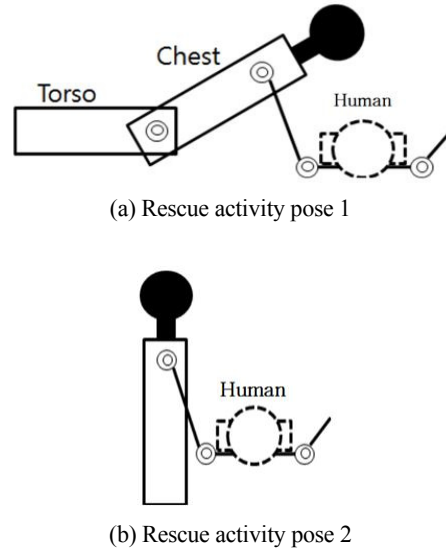


Fig. 2. Rescue activity with a dual arm manipulator

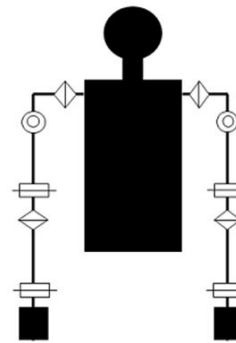


Fig. 3. Configuration of the proposed dual arm manipulator

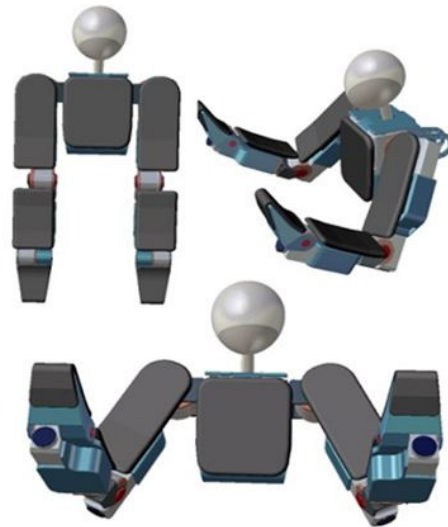


Fig. 4. Concept design of the dual arm manipulator

요 동력을 결정할 수 있다.

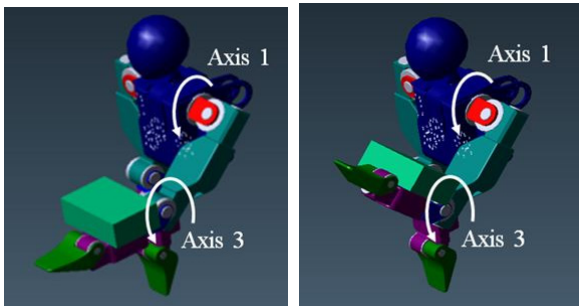
### 3. 양팔 매니플레이터 해석

제안된 양팔 매니플레이터의 구동력 해석, 구동모듈 설계, 양팔 매니플레이터 상세 설계를 위하여 Fig. 5와 같이 기구학 및 동역학 해석 모델을 구축하였다.

구난을 위한 가반하중 목표는 한 팔당 40 kg을 목표로 하였으며, 제안된 구조에서 구난 작업을 수행하는 경우 가장 큰 힘을 받게 되는 1축과 3축이므로, 1축, 3축에 대해서 다양한 각도와 조건 하에서 시뮬레이션을 수행하였다. 실제 구난 작업에서 이루어진 자세를 기준으로 로봇 자중과 가반 하중을 반영하여 각 축별 최대 토크를 산출하였다.

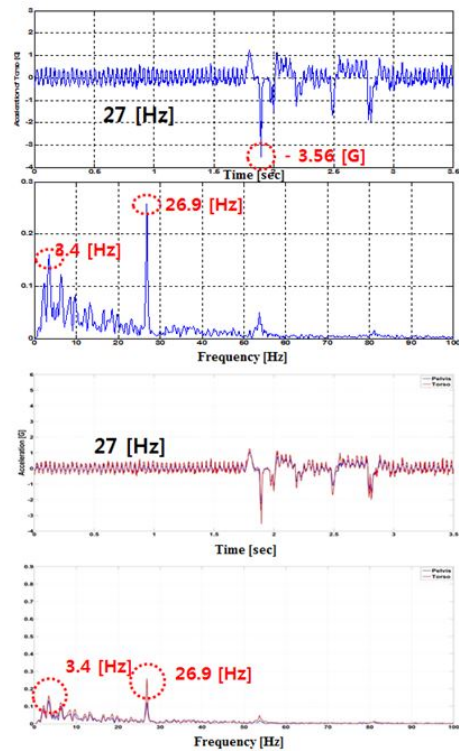
다음으로 구난용 양팔 매니플레이터는 모바일 로봇에 탑재되어 운영이 되기 때문에, 외부 환경으로부터의 진동에 의한 해석이 매우 중요하다. 실제 탑재가 될 계획인 모바일 로봇으로부터 인가된 외부 가진 데이터 분석을 통해 제안된 양팔 매니플레이터에 나타나는 동적 진동 분석을 수행하였다. Fig. 6은 다양한 지면 조건으로부터 발생한 진동 데이터의 한 예와 모바일로봇 플랫폼부와 허리부를 통과한 후에 양팔 매니플레이터의 베이스부에 인가되는 진동 데이터를 나타낸다.

여기서 의미있게 나타나는 주파수는 3~4 Hz 대역과 27 Hz 대역으로 나타나는데, 27 Hz 대역은 평지 주행시에 나타나는 로봇의 진동주파수로 모바일 로봇의 이동시 전 영역에서 고루 분포되어 있다. 또한 3~4 Hz는 모바일 로봇이 낮은 범퍼를 극복할 경우에 로봇의 거시적인 움직임에 대한 주파수로 일시적으로 나타나지만, 진동의 크기는 크게 나타난

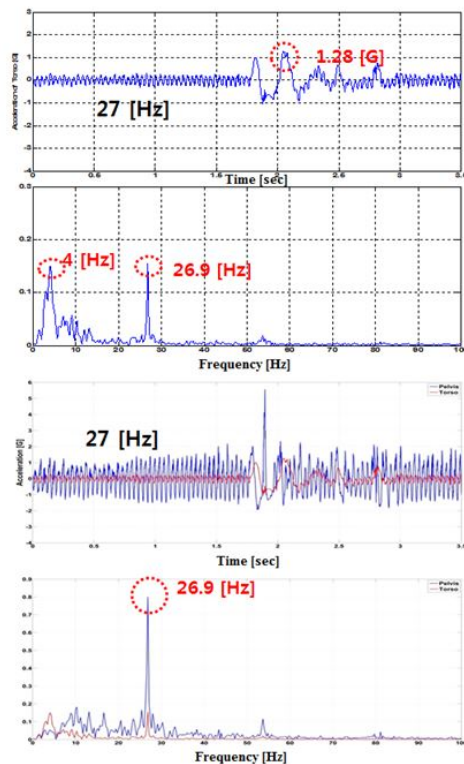


(a) 1 axis 45 deg, 3 axis 45 deg (b) 1 axis 45 deg, 3 axis 90 deg

Fig. 5. Simulation model of the dual arm manipulator



(a) Horizontal vibration



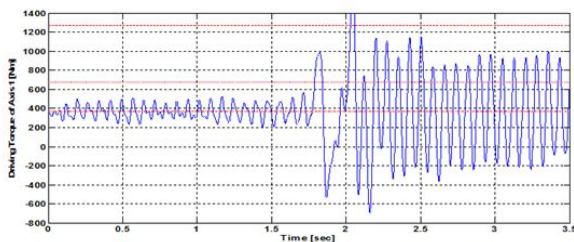
(b) Vertical vibration

Fig. 6. Vibration data from the mobile platform

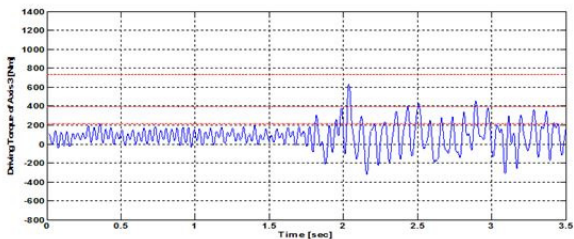
다. 이러한 지면에서의 진동 데이터는 상하 방향 진동은 일부 완화되어 양팔 매니플레이터에 전달되고, 전후 방향 진동은 상당 부분이 양팔 매니플레이터에 그대로 전달됨을 확인할 수 있다. 실제 양팔 매니플레이터에 전달되는 진동 데이터를 입력값으로 하여, 양팔 매니플레이터의 고유진동수 설계 및 최대 토크를 선정할 수 있다.

양팔 매니플레이터의 기하학적인 구조와 조인트의 강성 크기에 따라 양팔 매니플레이터의 고유진동수가 변화하게 되어, 진동 결과가 매우 달라지게 되므로 상황별로 자세한 해석이 필요하다. 구난 작업 중 발생할 수 있는 대표적인 두 가지 자세인 L자 자세와 V자 자세로 나누어 분석하였다. 또한 상하 방향의 진동과 전후 방향의 진동을 각각 분석하였으며, 상하, 전후 방향의 진동이 복합적으로 작용하는 환경에서의 분석도 수행하였다. 매니플레이터는 각 조인트의 강성에 따라 그리고 매니플레이터의 기구학 구조에 따라 고유진동수가 변하므로, 외부 가진 주파수에 의해 증폭 또는 감쇠되는 효과가 다르게 나타나므로, 조인트의 강성에 따라 추가적인 분석이 필요하다.

Fig. 7은 외부의 실제 진동 데이터의 의해 발생하는 조인트 토크값의 한 예를 나타낸다. 이와 같은 과정의 해석을 바탕으로 외부 가진에 의해 나타나는 각 조인트별 평균 토크, 최대 토크값을 기반으로 구동 모듈을 구성하는 모터,



(a) Joint torque for axis 1



(b) Joint torque for axis 3

Fig. 7. Joint torque on the external vibration

웍기어, 하모닉감속기 및 베어링 등 상세 부품의 사양을 선정하였다.

#### 4. 양팔 매니플레이터 제어부

양팔 매니플레이터 제어 알고리즘을 위한 기구학은 다음과 같은 DH 파라미터를 기반으로 구성되었다. 구난 작업을 위해 한 팔당 5자유도로 구성이 되어 있으므로 위치(Position)와 자세(Orientation)를 나누어서 결정하게 된다. 위치값은 3개의 자유도를 활용하여 얻어낼 수 있으며, 자세값은 자유도가 부족하므로 작업별로 정확한 회전 자세값 추종 목적이 아닌 최적의 자세값 결정을 목표로 한다.

예를 들어 구난 작업의 경우는 로봇팔 하바링크 평면이 최대한 지면과 평행하게 유지한다거나, 작업물 핸들링 작업

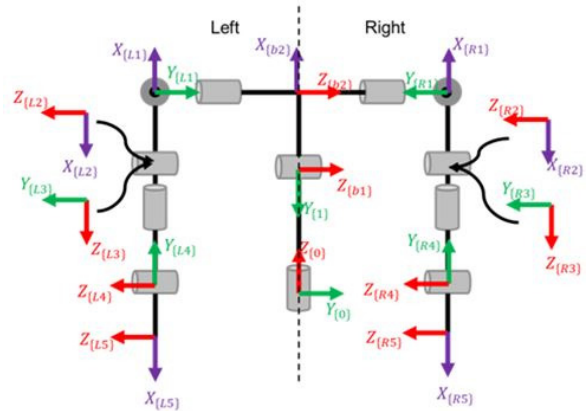


Fig. 8. DH parameter of the dual arm manipulator

$$q(t_{k+1}) = q(t_k) + \dot{q}(t_k)\Delta t$$

Definition of error :  $e = x_d - x_e$

$$\dot{e} = \dot{x}_d - \dot{x}_e$$

$$\dot{e} = \dot{x}_d - J_A(q)\dot{q}$$

$$\dot{q} = J_A^{-1}(q)(\dot{x}_d + Ke)$$

$$\dot{q} = J^{-1}(q)(\dot{x}_d + Ke)$$

$$\dot{e} + Ke = 0.$$

$$q(t_{k+1}) = q(t_k) + \dot{q}(t_k)\Delta t$$

$$\dot{q} = J_A^{-1}(q)(\dot{x}_d + Ke)$$

시는 끝단 링크가 최대한 아래 방향을 향하게 하는 방법을 사용할 수 있다. DH 파라미터에 따른 각 팔의 정기구학 계산은 좌표계 변환행렬을 이용하여 가능하며, 이를 기반으로 양팔 독립 모션의 페루프 역기구학 알고리즘 구현이 가능하다.

양팔 매니퓰레이터는 한 팔이 독립적으로 움직이는 모션 이외에도 필요에 따라서는 양팔 협력 모션과 같은 작업이 유용할 수 있으며, 따라서 양팔의 상대 기구학을 이용하여 양팔 매니퓰레이터의 협조 모션 수행할 수 있다.

### 5. 제작 및 실험

앞의 해석 결과를 바탕으로 양팔 매니퓰레이터의 구동 모듈에 대한 설계를 진행하였다. 요구되는 토크와 속도를 만족시키기 위한 구조로 모터, 웜기어, 하모닉감속기로 구성된 구동장치가 제안되었다. 서보모터로부터 발생하는 토크가 웜기어에 의해 1단 감속이 이루어지고 하모닉드라이브에 의해 2단 감속이 이루어져 고감속비에 의한 높은 파워를 낼 수 있는 구조로 개발되었다. 1축부터 3축은 각각의 요구 토크에 적합한 부품을 바탕으로 Fig. 9와 같은 구동장치 구조로 제안이 되었으며, 4축과 5축은 1축~3축에 비해 상대적으로 저토크가 요구되므로, 하모닉감속기 구조로 설계하였다.

설계 및 제작이 완료된 구난용 양팔 매니퓰레이터의 최종 형상은 Fig. 10과 같다.

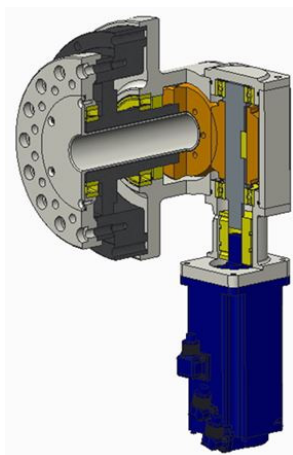


Fig. 9. Proposed actuating module

양팔 매니퓰레이터의 성능 검증 시험을 무부하, 부하 시험 환경을 구성하였으며, 엔코더 정보를 통해 조인트 회전각, 회전속도를 검증하고, 엔코더 정보와 각도명령의 차이로 조인트 에러 등을 확인하였다. 무부하, 부하 시의 관절 출력 토크를 측정함으로써 가반하중 목표항목 40 kg을 검증하였다. 개발된 양팔 매니퓰레이터의 성능 시험 결과는

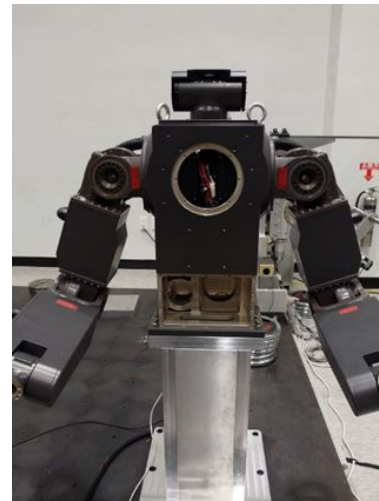


Fig. 10. Manufactured dual arm manipulator

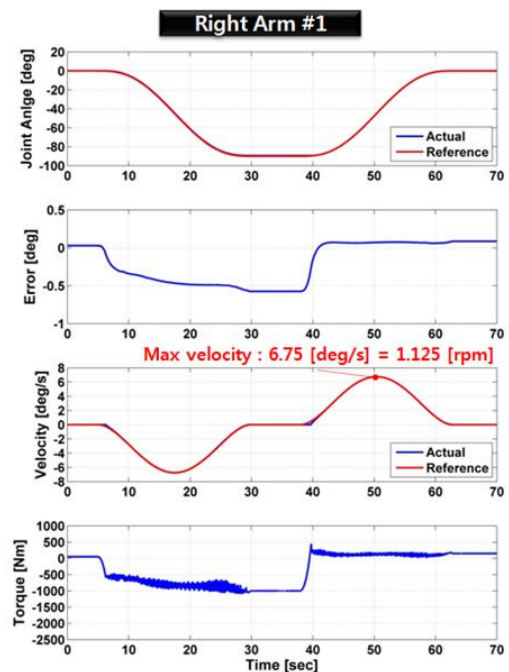


Fig. 11. Experimental results

Fig. 11에 나타난 바와 같으며, 구난 작업을 위한 필요 성능을 만족함을 확인하였다.

## 6. 결 론

본 논문에서는 이동형 구난 로봇에 탑재되어 구난 작업을 수행할 있는 양팔 매니퓰레이터에 대한 연구를 수행하였다. 구난작업을 위한 양팔 매니퓰레이터의 기구학적 구조와 요구 자유도를 제안하고, 이를 바탕으로 설계를 위한 기구학, 동역학 파라미터를 도출해 내었다. 구난 작업에 필요한 작업 해석을 통해 기구학적 파라미터를 결정하고, 구난작업의 목표 궤적에 기반한 정동적 시뮬레이션을 통해 각 조인트의 요구 토크를 분석하였다. 이 결과를 바탕으로 모터, 웜기어, 하모닉감속기로 구성된 구동 모듈을 설계하였으며, 이를 이용한 양팔 매니퓰레이터를 제작하고, 실험을 통하여 개발된 양팔로봇의 작업 성능을 검증하였다. 향후에는 외부 진동 및 구동부 마찰 등에 강인한 양팔 매니퓰레이터의 성능 향상에 관한 연구 수행이 요구된다.

## References

- [1] R. Zöllner, T. Asfour, and R. Dillmann, "Programming by Demonstration: Dual-Arm Manipulation Tasks for Humanoid Robots," IEEE/RSJ Intern. Conf. on Intelligent Robots and Systems (IROS 2004), Japan, September. 28 - October, 2, 2004, pp.479-484.
- [2] C. Park and K. Park, "Design and kinematics analysis of the dual arm robot manipulator for precision assembly," Proc. 2008. IEEE Int. Conf. Industrial Informatics, pp. 430-435.
- [3] H.M. Do, C. Park, and J.H. Kyung "Dual arm robot for packaging and assembling of it products," IEEE International Conference on Automation Science and Engineering, pp.1063-1066, 2012.
- [4] Toshiharu Mukai, Shinya Hirano, Hiromichi Nakashima, Yo Kato, Yuki Sakaida, Shijie Guo and Shigeyuki Hosoe, "Development of a Nursing-Care Assistant Robot RIBA That Can Lift a Human in Its Arms," The 2010 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, October, 2010, Taiwan.
- [5] John Hu, A. Edsinger, Yi-Je Lim, Nick Donaldson, Mario Solano, Aaron Solocheck, and Ronald Marchessault, "An advanced medical robotic system augmenting healthcare capabilities-robotic nursing assistant," IEEE International Conference on Robotics and Automation, ICRA 2011, May, 2011, pp.6264-6269.
- [6] Jienan Ding, Yi-Je Lim, Mario Solano, Kevin Shadle, Chris Park, Chris Lin, and John Hu, "Giving Patients A Lift- The Robotic Nursing Assistant (RoNA)," 2014 IEEE International Conference on Technologies for Practical Robot Applications (TePRA), pp.1-5, 2014.
- [7] D. Tsetsrukou, R. Tadakuma, H. Kajimoto, N. Kawakami, and S. Tachi, "Intelligent Variable Joint Impedance Control and Development of a New Whole-Sensitive Anthropomorphic Robot Arm," 2007 International Symposium on Computational Intelligence in Robotics and Automation(CIRA 2007), June, 2007, pp.338-343.
- [8] Muhammad Rehan Ahmed, and Ivan Kalaykov, "Semi-active compliant robot enabling collision safety for human robot interaction," 2010 International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA), August, 2010, pp.1932-1937.
- [9] O. Zebardast, H. Moradi, and F. Najafi, "Safe joint mechanism using passive compliance method for collision safety," 2013 First RSI/ISM International Conference on Robotics and Mechatronics (ICRoM), February, 2013, pp.102-106.
- [10] M. Okada, Y. Nakamura, and S. Hoshino, "Design of active/passive hybrid compliance in the frequency domainshaping dynamic compliance of humanoid shoulder mechanism," 2000, Proceedings. IEEE International Conference on Robotics and Automation(ICRA '00), pp.2250-22570.
- [11] Yeon Taek Oh, "Development of Humanoid Joint Module for Safe Human-Robot Interaction," Journal of Korea Robotics Society, 2014, vol.9, no.4, pp.264-271.
- [12] Young-Jin Park, and Wan-Kyun Chung, "Exact Reshaping of Motor Dynamics in Flexible-Joint Robot using Integral Manifold Feedback Control," Journal of Korea Robotics Society, 2014, vol.9, no.1, pp.20-27.



**박 동 일**

2000 KAIST 기계공학과(공학사)  
2002 KAIST 기계공학과(공학석사)  
2006 KAIST 기계공학과(공학박사)  
2006~현재 한국기계연구원 로봇메카트로닉스 연구실

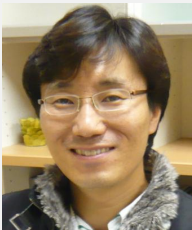
관심분야 : 로봇 해석 및 설계, 로봇 머니플레이터



**김 두 형**

1997 서울대 전기공학부(공학사)  
1999 서울대 전기공학부(공학석사)  
2004 서울대 전기컴퓨터공학부(공학박사)  
1982~현재 한국기계연구원 로봇메카트로닉스 연구실

관심분야: 산업용 로봇 제어, 로봇 안전기술



**박 찬 훈**

1994 영남대 기계공학과(공학사)  
1996 POSTECH 기계공학과(공학석사)  
2010 KAIST 기계공학과(공학박사)  
1996~현재 한국기계연구원 로봇메카트로닉스 연구실

관심분야: 산업용 로봇, 로봇 설계 및 제어



**경 진 호**

1985 항공대 기계공학과(공학사)  
1988 항공대 기계공학과(공학석사)  
2003 KAIST 기계공학과(공학박사)  
1988~현재 한국기계연구원 로봇메카트로닉스 연구실

관심분야: 양팔로봇 설계 및 제어, 협동로봇