

임무에 따른 하박 교체형 고 가반하중 양팔로봇의 설계: 구난 및 물체 핸들링

Design of High Payload Dual Arm Robot with Replaceable Forearm Module for Multiple Tasks: Human Rescue and Object Handling

김 휘 수¹·박 동 일¹·최 태 용¹·도 현 민¹·김 두 형¹·경 진 호¹·박 찬 훈[†]
Hwisu Kim¹, Dongil Park¹, Taeyong Choi¹, Hyunmin Do¹, Doohyeong Kim¹,
Jinho Kyung¹, Chanhun Park[†]

Abstract: Robot arms are being increasingly used in various fields with special attention given to unmanned systems. In this research, we developed a high payload dual-arm robot, in which the forearm module is replaceable to meet the assigned task, such as object handling or lifting humans in a rescue operation. With each forearm module specialized for an assigned task (e.g. safety for rescue and redundant joints for object handling task), the robot can conduct various tasks more effectively than could be done previously. In this paper, the design of the high payload dual-arm robot with replaceable forearm function is described in detail. Two forearms are developed here. Each of forearm has quite a different goal. One of the forearms is specialized for human rescue in human familiar flat aspect and compliance parts. Other is for general heavy objects, more than 30 kg, handling with high degree of freedom more than 7.

Keywords: Dual Arm Robot, Rescue Robot, Manipulator Design, Replaceable Manipulator

1. 서 론

최근 로봇 기술의 발달과 더불어, 기존 제조용 로봇 분야뿐만 아니라 가사, 의료 및 엔터테인먼트 등 다양한 분야에 적용 가능한 로봇이 개발되고 있다. 또한 다양한 분야에서 무인화에 대한 요구가 증가하면서, 실내뿐만 아니라 실외 환경에서의 로봇에 대한 필요성이 증가하고 있다. 특히 국방분야에서는 대부분의 작업이 위험성이 높은 야지에서 수행되므로, 로봇을 활용한 무인화에 대한 노력이 활발하다.

일반적으로 모바일 플랫폼 등의 이동체만으로 구성된 초기의 군용로봇의 경우 카메라를 활용한 감시정찰 및 물건 이송과 같은 수동적인 임무에만 적용이 가능하였다^[1]. 그러나 근래에 개발되는 군용 로봇은 모바일 플랫폼에 물체를 핸들링 할 수 있는 매니플레이터를 장착함으로써 폭발물 제거와 같은 다양한 능동적 임무에 활용 가능하다^[2,3]. 또한 최근에는 군용로봇에도 양팔로봇기술이 적용되면서 부상자 구난 등 더욱 복잡한 임무에 로봇 활용한 무인화가 가능해 졌다^[4,5].

일반적으로 매니플레이터는 말단부에 부착되는 그리퍼(혹은 핸드)를 교체함으로써 다양한 물체를 파지하거나 이동시킬 수 있다. 본 개발에서는 단순히 그리퍼 교체로 해결이 안 되는 임무변화에 대응하기 위해서 하박교체형 양팔로봇을 개발한다. 개발하는 양팔로봇은 부상자 구난 및 중량물 핸들링을 목표로 한다. 각각의 임무는 매우 상이한 기능을 갖는 매니플레이터를 필요로 한다. 부상자 후송을 위해서는 일반적인 매니플레이터가 가지는 6자유도 이상의 자유도보다는 안정

Received : Oct. 17. 2017; Revised : Nov. 20. 2017; Accepted : Nov. 22. 2017

※ This research was supported by a grant by the Agency for Defense Development. "Technology development for a rescue robot capable of lifting over 120 kg", funded by the Dual-use technology program.

1. Department of Robotics and Mechatronics, Korea Institute of Machinery and Materials (hskim81@kimm.re.kr, parkstar@kimm.re.kr, taeyongc@kimm.re.kr, hmido@kimm.re.kr, kdh469@kimm.re.kr, jhkyung@kimm.re.kr)

† Corresponding author: Korea Institute of Machinery and Materials, 156 Gajeongbuk-Ro, Yuseong-Gu, Daejeon, Korea (chpark@kimm.re.kr)

적인 부상자 후송을 위한 제한된 자유도와 사람을 들 수 있는 형태의 팔이 더 적합하다. 목적으로 하는 구난 임무의 경우 최소 80 kg 이상의 사람을 양팔로 들어올리는 자유도와 힘이 중요하다. 자유도가 많을 경우 제한된 공간때문에 말단으로 갈수록 고출력을 확보하는 것이 현실적으로 불가능하다. 본 연구에서는 고출력을 확보하면서 사람을 들 수 있는 고출력을 확보하기 위해서 자유도를 4자유도로 절충하였다. 반면 중량물 핸들링을 위해서는 6자유도 이상의 고자유도와 고중량이지만 작은 크기의 하박이 적합하다. 이런 상이한 목표를 하나의 로봇으로 이루기는 힘들다. 유사 목적으로 연구되고 있는 모둘기반 로봇은 다양한 목표를 이루는데 적합하지만, 연결부위의 강성을 확보하기 힘들어 정밀작업에는 적합하지 않다¹⁾.

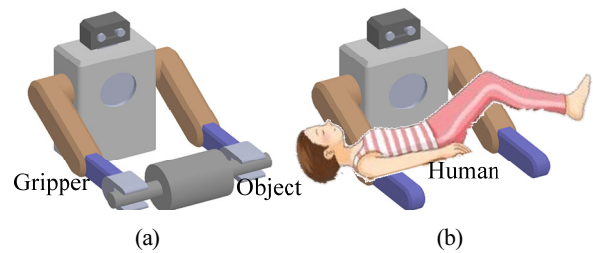
본 연구에서는 이러한 문제를 해결하기 위하여 각 임무에 특화된 매니플레이터 하박모듈을 설계하고, 필요 상황에 따라 로봇에 결합함으로써 복수의 임무를 수행할 수 있는 하박교체형 고가반하중 양팔로봇을 개발한다. 파지용 하박의 경우, 기존 제조용 로봇과 같이 높은 강성 및 정밀도를 갖도록 설계되었으며, 로봇과의 결합 시에 여유자유도 구조를 갖도록 함으로써, 원활한 물체 핸들링이 가능하도록 하였다. 반면에 구난용 하박의 경우에는 컴플라이언스 기반 안전 장치를 설치하여 구난 작업 시에 발생할 수 있는 각종 위험상황으로부터 부상자를 보호할 수 있도록 하였고, 안정적으로 부상자를 들어올리는 것이 가능하도록 설계하였다. 본 연구범위에는 부상자의 이송에 필요한 양팔로봇을 탑재할 모바일 로봇은 제외한다. 고가반하중 모바일 로봇은 별도의 연구로 진행된다. 본 연구에서 개발되는 양팔로봇은 구난 임무와 중량물 핸들링을 고려하여 높은 기중력 및 가반하중을 갖도록 설계되었으며, 실외 환경에서의 동작을 감안하여 방진 및 방수가 가능하도록 설계되었다.

본 논문은 다음과 같이 구성된다. 2장에서는 물체 파지 및 구난 임무를 위한 매니플레이터의 필요 조건을 분석한다. 3장에서는 이를 바탕으로 각 임무에 특화된 하박 모듈 및 공통으로 사용되는 상박모듈의 설계에 대하여 설명한다. 4장에서는 개발된 양팔로봇의 성능을 보인다. 마지막으로 5장에서는 결과 및 앞으로의 연구 계획에 대하여 고찰한다.

2. 작업 분석 및 설계 컨셉트

2.1 구난 및 물체 핸들링을 위한 요구조건 분석

본 연구에서는 [Fig. 1]과 같이 야지에서 부상자 구난 및 위험물(중량물) 핸들링 임무에 활용 가능한 양팔 로봇 플랫폼을



[Fig. 1] Tasks of dual arm robot: (a) object grasping and handling, and (b) human lifting for rescue

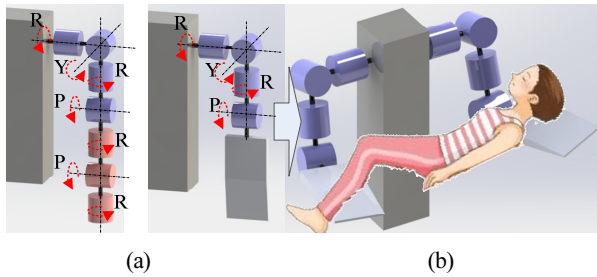
개발한다. 일반적으로 로봇 매니플레이터는 말단부에 부착되는 그리퍼 등의 장치에 따라 다양한 작업 수행이 가능하다. 따라서 다양한 사양 및 형상의 그리퍼를 구비함으로써 [Fig. 1(a)]과 같이 본 연구에서 목표로 하는 물체 파지 및 핸들링 임무를 수행할 수 있다. 이와 같은 물체 핸들링 작업에서는 위치 정밀도가 매우 중요한 요소이므로, 기존 제조용 로봇과 같이 정밀 감속기(e.g. 하모닉기어 등)를 사용한 고강성 설계가 필요하다. 또한 다양한 상황에서 효과적인 작업수행을 위해서는 여유자유도 구조를 갖는 것이 유리하다.

반면에 개발되는 로봇의 또 다른 목적인 부상자 구난을 위해서는 물체 핸들링을 위한 매니플레이터와 매우 상이한 특징을 갖는 설계가 요구된다. 예를 들어 구난 임무를 위해서는 바닥에 쓰러져 있는 부상자를 [Fig. 1(b)]와 같이 안아 올려서 안전한 지역까지 이송해야 하므로, 매니플레이터는 안정적으로 사람을 지지할 수 있도록 얇고 넓은 형상으로 설계되어야 한다. 그러나 효과적인 물체 핸들링을 위해서는 다수의 관절설계가 필요하므로 모터 및 감속기 등의 구성요소 배치로 인하여 로봇팔을 얇고 평평하게 설계하기에는 한계가 있다. 또한 로봇과 사람의 접촉이 발생하는 구난 작업을 위해서는 오동작 등의 위험상황으로부터 사람을 보호할 수 있는 컴플라이언스 구조가 필요한 반면, 정밀한 물체 핸들링을 위해서는 높은 강성의 매니플레이터가 필요하다. 이와 같이 단순 물체 파지 및 핸들링이 아닌 구난 임무와 같이 로봇 전체를 활용한 작업 수행이 필요한 경우에는 해당 작업에 맞는 매니플레이터 설계가 필요하다.

따라서 이와 같은 상황에서는 단순히 그리퍼의 교체로 매우 상이한 특징의 로봇을 요구하는 복수의 임무를 효과적으로 수행하기 힘들기 때문에 각각의 용도를 위한 별도의 로봇을 개발하는 것이 일반적이다.

2.2 설계 컨셉트

본 연구에서는 앞서 기술한 문제를 해결하고자 임무에 따라 하박 모듈을 교체함으로써 상이한 복수의 임무에 활용 가



[Fig. 2] Joint structure for each task: Object handling and human lifting: (a) 7DOFs for object handling, and (b) 4DOFs for human lifting

능한 양팔로봇 플랫폼을 개발하였다. 또한 이를 위하여 물체 핸들링 및 구난작업에 특화된 하박 모듈을 각각 개발하여 공용으로 활용되는 매니플레이터 상박과 결합함으로써 로봇이 효과적으로 각각의 임무를 수행할 수 있게 하였다.

[Fig. 2]에서 볼 수 있듯이, 물체 핸들링용 하박은 Roll-Pitch-Roll 의 3자유도로 설계함으로써 4자유도로 구성된 상박과 결합 시에 전체 매니플레이터가 여유자유도 구조를 갖도록 함으로써 원활한 작업이 가능하도록 하였다. 또한 기존의 제조용 로봇과 같이 고정밀 / 고정성의 감속기와 BLDC 모터를 사용함으로써 높은 위치정밀도와 가반하중 30 kg을 달성할 수 있게 하였다. 힘 측면에서는 유압구동기가 유리하지만, 회전각을 충분히 확보하기 힘들고, 하박교체를 위한 유압 체결방법이 없기 때문에 본 연구에서는 전기모터를 사용한다.

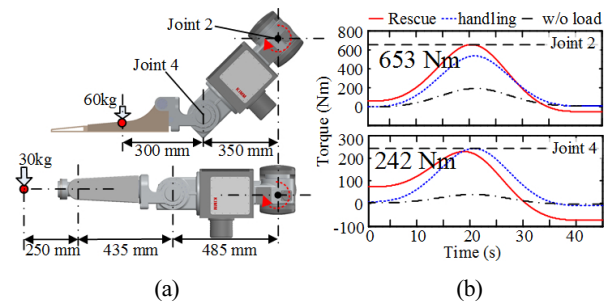
반면 구난 작업의 경우, 물체 핸들링과는 달리 매니플레이터 상박에 위치한 4개의 관절로도 충분히 임무수행이 가능하므로, 구난용 하박에는 능동 자유도를 삽입하지 않았다. 이로 인하여 하박 내부에 별도의 감속기 및 모터를 삽입할 필요가 없으므로 바닥에 위치한 부상자를 효과적으로 안아 올릴 수 있는 평평하고 얇은 구조 설계가 가능하다. 또한 능동 관절 대신 컴플라이언스를 갖는 2개의 수동 관절을 삽입함으로써 위험상황 시에 사람의 상해를 방지하거나 최소화 할 수 있게 하였다.

로봇의 구성을 위한 몸통 및 매니플레이터 상박의 경우, 부하해석 등을 통하여 두 임무 모두 적용 가능한 형상 및 사양으로 설계하였으며, 두 하박 모듈이 공용으로 부착될 수 있는 결합부를 설치하였다.

3. 매니플레이터 설계

3.1 부하 해석

일반적으로 로봇의 설계 시에는 각 관절에 인가되는 부하를 해석하고, 이를 바탕으로 목표하는 작업 수행에 적합한 사



[Fig. 3] Load analysis: (a) simulation condition and (b) result

[Table 1] Requirements for rescue and object handling tasks

Rescue	Task	Object handling
Only 3 ~ 4 joints	Joints	7 DOFs for redundant motion
Low stiffness for safety	Stiffness	High stiffness for positioning accuracy
Flat and thin shape	Shape	Structure design considering installation of gears and motors
Lifting capacity: 120 kg	Specification (Power)	Payload @ end effector: 30 kg/arm

양의 부품을 선정한다. 본 연구에서는 기 수행된 양팔로봇 개발을 토대로 [Fig. 3]와 같이 로봇의 각 부분별 무게를 가정하고 Recurdyne[®]을 사용한 시뮬레이션을 통해 목표하는 구난 작업 및 물체 핸들링 작업 시에 인가되는 부하를 산정하였다. 부하해석을 위해서 [Table 1]에서 제시한 목표와 같이 물체 파지 및 구난 작업을 가정하여 각각 30 kg 및 60 kg의 부하를 매니플레이터 끝 단에서 일정거리 떨어진 지점과 하박의 일정위치에 인가하였으며, 구난 시의 안전 등을 고려하여 관절당 최대 9°/s (1.5 RPM)의 속도로 회전한다고 가정하였다.

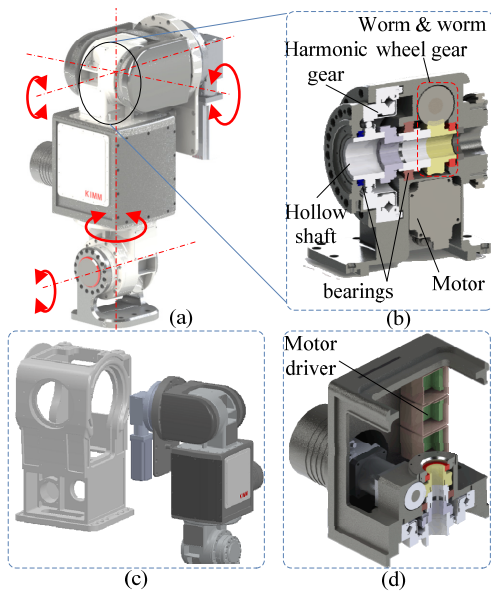
[Fig. 3(b)]의 해석 결과 구난 작업 시에 관절 1에 최대 653 Nm의 토크가 인가됨을 알 수 있으며, 이와 같은 해석을 바탕으로 기어 감속비, 동력전달요소(기어 및 감속기)의 효율 및 설계 안전율 등을 고려하여 해당관절에 적절한 모터, 감속기 및 웜기어 등을 선정할 수 있다. 또한 부하해석 결과는 로봇의 각 프레임 등 주요부품 설계를 위한 FEM 해석에 활용함으로써 로봇의 강성을 유지하면서 중량을 최소화 할 수 있다. 상기의 과정을 반복하면서 외관의 디자인을 변경하고, 프레임 내부의 필요 없는 부분을 삭제하면서 경량화를 수행하였다.

3.2 로봇 상박 및 몸통 설계

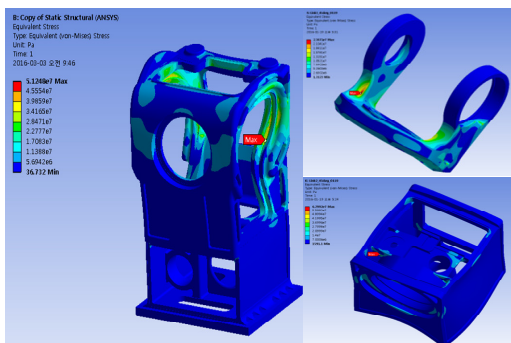
본 연구에서 개발되는 양팔로봇의 상박 및 몸통은 구난 및 물체 핸들링 작업에 공용으로 활용되므로 부하해석 결과를 바탕으로 두 작업을 모두 만족시킬 수 있는 사양으로 설계되었

다. 본 연구에서 설계된 로봇팔의 상박은 [Fig. 4]와 같이 목표하는 두 작업을 효과적으로 수행할 수 있도록 Roll-Yaw-Roll-Pitch의 4자유도로 구성하였다. 특히 로봇 상박에는 정밀 감속기와 함께 ‘웜 & 웜휠’ 기어를 활용함으로써 높은 감속비 및 토크를 확보하는 동시에 로봇 팔의 역구동을 근본적으로 방지하여 배터리 방전 및 고장 등의 문제로 로봇의 전원이 꺼진 상황에서도 로봇 팔이 안정적으로 사람을 지지할 수 있도록 하였다. 모든 관절은 케이블링을 고려하여 중공형으로 설계하였으며, 매니플레이터 내부에 모터 제어기를 위치 시킴으로써 중공을 통과하는 케이블의 수를 최소화 하였다.

본 연구에서 개발되는 로봇은 실외에서 배터리로 구동되는 경우에도 동작을 목표로 한다. 전력 소모를 최소화하여 구동시간을 향상시키기 위해서는 로봇의 경량화가 필수이다. 반면에 구난 작업 및 중량물 파지 시에 로봇에 큰 부하가 인가되므로 최소한의 강도를 확보할 수 있도록 설계되어야 한다. 본 연구



[Fig. 4] Design of torso and upper arm module: (a) upper arm module, (b) joint module, (c) assembly between torso and upper arm module, and (d) installation of motor drive



[Fig. 5] FEM analysis for robot design

에서는 이를 위하여 [Fig. 5]과 같이 부하해석 결과를 바탕으로 한 구조해석을 수행함으로써 양팔로봇 몸통 등의 각 프레임을 설계하였다.

3.3 모듈형 하박 관절 설계

본 연구에서 개발되는 로봇에 부과된 구난 및 물체 핸들링 임무를 효과적으로 수행하기 위하여 각 임무에 특화된 하박 모듈을 설계하였다.

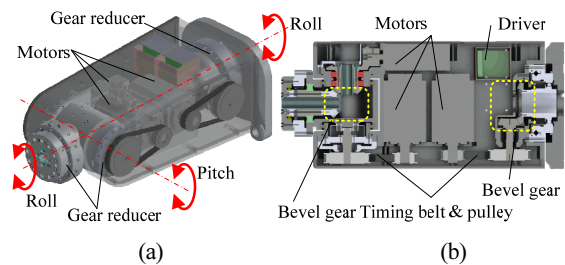
3.3.1 파지용 하박 모듈 설계

일반적으로 물체를 조작하는 작업을 위해서는 기존 산업용 로봇과 같은 다자유도, 고강성, 고정밀의 매니플레이터가 유리하다. 이를 위하여 본 연구에서는 [Fig. 6]과 같이 AC 모터 및 정밀 감속기로 구성된 파지용 하박 모듈을 설계하였다.

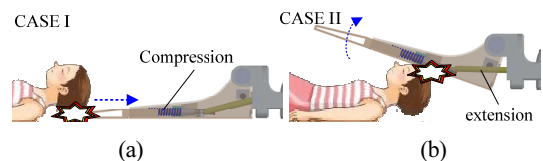
설계된 하박 모듈은 30 kg의 물체 핸들링이 가능하도록 구성하였으며, 앞 절에서 소개한 상박 모듈과 결합하여 7 DOFs의 여유자유도를 갖도록 Roll-pitch-Roll의 3 DOFs로 설계되었다. 한정된 공간에 모터와 감속기를 효과적으로 배치하기 위하여 [Fig. 6(b)]과 같이 베벨 기어 및 타이밍 벨트를 적용하였으며 부하해석 결과를 바탕으로 적절한 감속비를 설정함으로써 토크를 확보하였다.

3.3.2 구난용 하박 모듈 설계

구난용 하박의 경우에는 물체 파지용 하박과 달리 로봇의 고장, 오동작 등으로 인한 이상상황에서 구난하는 사람을 보호할 수 있어야 한다. 본 연구에서는 이를 위하여 [Fig. 7]과 같



[Fig. 6] Design of forearm module for object handling: (a) rotational joint, and (b) structure



[Fig. 7] Overview of the passive compliance module to enhance safety for human rescue task: (a) poke, and (b) press

이 로봇이 사람을 찌르거나 누르는 위험상황에서 사람에게 인가되는 힘을 최소화 할 수 있도록 구난용 하박모듈에 2개의 수동 컴플라이언스 관절을 삽입하였다.

하박모듈에 위치한 두 개의 수동 컴플라이언스 관절들은 사람을 찌르는 상황과 누르는 상황에 대응하기 위하여 각각 직동관절 및 회전 관절로 설계되었으며, 초기 압축/인장된 스프링을 적용함으로써 로봇의 움직임에 따른 컴플라이언스 관절의 진동을 방지하는 동시에 향후 적용 상황에 맞는 적절한 강성을 갖도록 하였다. 사용되는 스프링의 강성 및 초기 압축 거리는 [Table 2]의 ISO TS 15066 기준을 참고하여 로봇의 적용 상황에 따라 변경할 수 있도록 하였다. 인장 스프링을 적용한 회전 관절과 달리 압축스프링을 적용한 직동 관절의 경우 스프링 좌굴을 방지하기 위하여 샤프트 및 리니어 부쉬를 적용하였다. 또한 각 컴플라이언스 관절에는 회전 및 직선 엔코더를 적용하여 관절의 변위를 측정할 수 있게 하였다. 이로 인하여 [Fig. 9]의 위험상황에서 원격 사용자에게 충돌 상황을 인지시킴으로써, 적절한 안전조치를 취할 수 있게 하였다.

본 연구에서 설계되는 구난용 하박의 경우 파지용 하박과

달리 별도의 능동 자유도 구성을 위한 모터 및 감속기가 필요 없으므로 [Fig. 8]와 같이 구난 임무에 유리한 평평하고 얇은 형상설계가 가능하다. 또한 하박 모듈 자체의 중량을 최소화 함으로써 로봇의 기중력을 극대화하여 안정적으로 사람을 안아 올릴 수 있게 하였다.

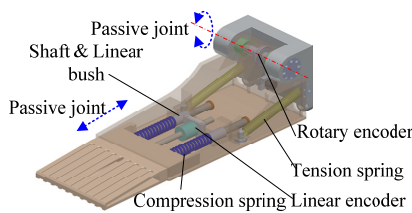
4. 프로토타입 설계/제작 및 성능검증

본 연구에서는 [Fig. 9]과 같이 하박 교체형 고 가반하중 양팔로봇의 프로토타입을 설계하고, 목표로 하는 임무수행의 가능성을 검증하기 위하여 프로토타입을 제작하였다. 로봇무게의 경량화를 위하여 대부분의 주요 부품은 알루미늄 합금으로 설계하였다. 로봇의 최종 사양은 [Table 3]과 같다.

설계된 프로토타입을 바탕으로 Feasibility test를 위한 프로토타입을 제작하고 성능검증을 수행하였다. 이를 위하여 [Fig. 10]과 같이 제작된 토르소 및 상박모듈에 파지용 하박을 부착한 후 목표 가반하중(30 kg)을 들어 올릴 수 있는지 검증하였으며, 양팔을 활용하여 중량물 조립 등의 작업이 가능함을 확인하였다.

[Table 2] Biomechanical Limit in ISO TS 15066 Annex^[7]

Body region	Specific Body Area	Max. Allowable Force (N)
Skull and forehead	Middle of forehead	130
	Temple	
Face	Masticatory muscle	65
Neck	Neck muscle	145



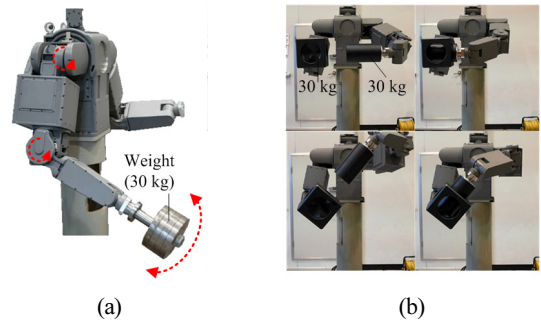
[Fig. 8] Design of forearm module for human rescue

[Table 3] Specifications of dual arm robot

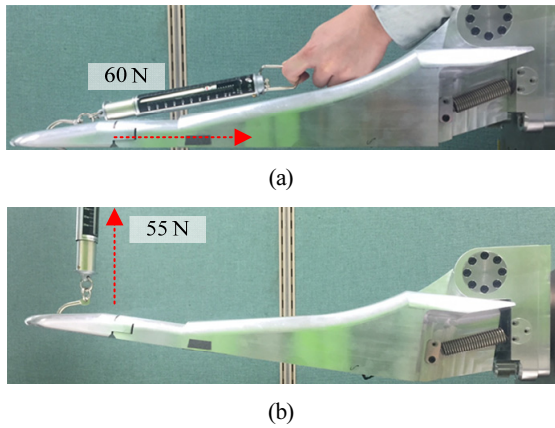
Item	Specifications of robot arm	
	With forearm modules for object handling	With forearm modules for rescue
Structure	7DOFs (R-Y-R-P-R-P-R)	4DOFs (R-Y-R-P) + passive joint
Payload	30 kg/arm @ end-effector	-
Lifting capacity	-	60 kg/arm @ forearm
Weight	160 kg	140 kg
speed	Max. 3 RPM	Max. 3 RPM
Reach	1170 mm	1430 mm
Precision(pos.)	100 μm	-



[Fig. 9] Design of dual arm robot; (a) object grasping and handling, and (b) human lifting for rescue



[Fig. 10] (a) Experiments, and (b) demonstrations to verify performance of dual arm robot



[Fig. 11] Feasibility test for rescue module: Max. applied force while the forearm module (a) poke and (b) press the human body

[Fig. 11]의 구난용 하박 모듈의 경우, 설계된 구조 및 선정된 스프링을 통해 안전한 구난 작업을 위한 적절한 유연성을 갖는지 검증하였다. 용수철저울(Spring scale)을 사용하여 측정한 결과 찌르는 방향 및 누르는 방향에서 각각 최대 60 N, 55 Nm의 힘을 발생시켰으며, ISO TS 15066 기준으로 인체 대부분의 부위에 대하여 안전성을 갖는 것을 알 수 있다. 이때 각 수동 컴플라이언스 관절에 적용된 스프링의 강성은 2.1 N/mm이며, 컴플라이언스 정도는 스프링의 교체로 조절 가능하다.

5. 결론 및 향후 연구계획

본 논문에서는 기존 산업용 로봇과 같이 높은 강성 및 정밀도를 요하는 물체 핸들링 작업과 안전성이 필수인 구난작업을 모두 수행하기 위하여, 공통으로 활용되는 토르소 및 매니플레이터 상박에 임무에 특화된 하박 모듈을 결합함으로써 매우 상이한 특성의 임무를 하나의 로봇으로 달성할 수 있는 솔루션을 제시하였다. 즉, 물체 핸들링용 하박은 기존 제조용 로봇과 같이 높은 강성으로 설계되었으며, 원활한 조작을 위해 상박과의 결합 시에 여유자유도를 제공할 수 있도록 다수의 능동 자유도로 구성되었다. 반면에 구난용 하박의 경우 효과적인 임무수행을 위하여 구난에 유리한 넓고 평평한 구조로 설계되었으며, 물체파지용 하박에 비하여 무게를 경감함으로써 기중력을 극대화하여 사람의 안정적인 파지가 가능하게 하였다. 또한 수동 컴플라이언스 관절을 통해 안전한 구난 작업이 가능하도록 설계하였다. 한편 Feasibility test를 위한 프로토타입을 설계하고 제작하여 실험을 수행함으로써 가능성을 확인하였다.

본 연구에서는 향후 로봇 설계 개선 및 시제품 제작, 제어알고리즘 구현 등이 예정되어 있다.

References

- [1] M. Raibert, "Dynamic legged robots for rough terrain," *2010 10th IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots*, p. 1. 2010, doi: 10.1109/ICHR.2010.5686280
- [2] Y. Brian, "All-Weather Perception for Man-Portable Robots Using Ultra-Wideband Rader," *2010 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 3610-3615, 2010.
- [3] S. C. Kang, C. H. Cho, J. H. Lee, D. S. Ryu, C. W. Park, K.-C. Shin, and M. S. Kim, "ROBHAZ-DT2: Design and Integration of Passive Double Tracked Mobile Manipulator System for Explosive Ordnance Disposal," *2003 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 2624-2629, 2003.
- [4] J. Ding, Y. J Lim, M. Solano, K. Shadle, C. Park, C. Lin, and J. Hu, "Giving patients a lift-the robotic nursing assistant (RoNA)," *2014 IEEE International Conference on Technologies for Practical Robot Applications*, pp. 1-5. 2014.
- [5] Wikipedia, BEAR Battlefield Extraction-Assist Robot, [Online], https://en.wikipedia.org/wiki/Battlefield_Extraction-Assist_Robot, Accessed: September 2, 2017.
- [6] H. Do, T. Choi, D. Park, D. Kim, and Y. Son, "Design of Self-Reconfigurable Kinematics and Control Engine for Modular Robot," *Journal of Korea Robotics Society*, vol. 11, no. 4, pp. 270-276, 2016.
- [7] ISO/TS 15066, Robots and robotic devices-Collaborative robots, [Online], <https://www.iso.org/standard/62996.html>, Accessed: September 27, 2017.



김 휘 수

2007 고려대학교 기계공학과(학사)
 2014 고려대학교 기계공학과(박사)
 2014~2014 고려대학교 기계공학과 연구교수
 2015~현재 한국기계연구원 로봇메카트로닉스 연구실 선임연구원

관심분야: 로봇 설계, 로봇 안전 기술 등



박 동 일

2000 KAIST 기계공학과(학사)
 2002 KAIST 기계공학과(석사)
 2006 KAIST 기계공학과(박사)
 2006~현재 한국기계연구원 로봇메카트로닉스 연구실 선임연구원

관심분야: 로봇 설계, 해석 및 응용 등



경 진 호

1985 한국항공대학교 기계공학과(학사)
 1988 한국항공대학교 기계공학과(석사)
 2003 KAIST 기계공학과(박사)
 2003~현재 한국기계연구원 로봇메카트로닉스 연구실 책임연구원

관심분야: 산업용 로봇 설계 및 제어, 인간 로봇 협조 시스템 등



최 태 응

2003 POSTECH 전자전기공학과(학사)
 2010 KAIST 전기전자공학과(박사)
 2010.2~2010.12 삼성전자 생산기술원 책임연구원
 2011~현재 한국기계연구원 로봇메카트로닉스 연구실 선임연구원

관심분야: 산업용 로봇 제어, 산업 지능 등



박 찬 훈

1994 영남대학교 기계공학과(학사)
 1996 POSTECH 기계공학과(석사)
 2010 KASIT 기계공학과(박사)
 1996~현재 한국기계연구원 로봇메카트로닉스 연구실 책임연구원

관심분야: 산업용 양팔로봇 설계, 군사용 양팔로봇 설계 및 제어 등



도 현 민

1997 서울대학교 전기공학부(학사)
 1999 서울대학교 전기공학부(석사)
 2004 서울대학교 전기컴퓨터공학부(박사)
 2004~2007 현대자동차 선임연구원
 2007~2010 AIST(일본) 특별연구원
 2010~현재 한국기계연구원 로봇메카트로닉스 연구실 선임연구원

관심분야: 산업용 로봇 제어, 로봇 안전 기술 등



김 두 형

1982 서울대학교 기계공학과(학사)
 1990 KAIST 기계공학과(석사)
 2003 KAIST 기계공학과(박사)
 1982~현재 한국기계연구원 로봇메카트로닉스 연구실 책임연구원

관심분야: 산업용 로봇 설계 및 제어 등