

## 환경 적응형 로봇의 기계식 중력보상 기반 다리 구조

박희창<sup>\*,\*\*</sup>, 오장석<sup>\*,#</sup>, 조용준<sup>\*,\*\*\*</sup>, 윤해룡<sup>\*</sup>, 홍형길<sup>\*</sup>, 강민수<sup>\*</sup>, 박관형<sup>\*</sup>,  
송재복<sup>\*\*,#</sup>

<sup>\*</sup>한국로봇융합연구원 농업로봇자동화연구센터, <sup>\*\*</sup>고려대학교 기계공학과,

<sup>\*\*\*</sup>안동대학교 바이오ICT융합공학과

## Leg Structure based on Counterbalance Mechanism for Environmental Adaptive Robot

Hui-Chang Park<sup>\*\*,\*</sup>, Jang-Seok Oh<sup>\*,#</sup>, Yong-Jun Cho<sup>\*\*\*</sup>, Hae-Yong Yun<sup>\*</sup>,  
Hyung-Gil Hong<sup>\*</sup>, Min-Su Kang<sup>\*</sup>, Kwan-Hyung Park<sup>\*</sup> and Jae-Bok Song<sup>\*\*,#</sup>

<sup>\*</sup>Korea Institute of Robotics & Technology Convergence, <sup>\*\*</sup>Dept. of Mechanical Engineering, Korea

University, <sup>\*\*\*</sup>Dept. of Bio-ICT Engineering, Andong National University

(Received 28 May 2022; received in revised form 13 June 2022; accepted 08 July 2022)

### ABSTRACT

As the COVID-19 continues, the demand for robotic technology that can be applied in face-to-face tasks such as delivery and transportation, is increasing. Although these technologies have been developed and applied in various industries, the robots can only be operated in a tidy indoor environment and have limitations in terms of payload. To overcome these problems, we developed a 2 degree of freedom(DOF) environmental adaptive robot leg with a double 1-DOF counterbalance mechanism (CBM) based on wire roller. The double 1-DOF CBM is applied to the two revolute joints of the proposed robot leg to compensate for the weight of the mobile robot platform and part of the payload. In addition, the link of the robot leg is designed in a parallelogram structure based on a belt pulley to enable efficient control of the mobile platform. In this study, we propose the principle and structure of the CBM that is suitable for the robot leg, and design of the counterbalance robot leg module for the environment-adaptive control. Further, we verify the performance of the proposed counterbalance robot leg by using dynamic simulations and experiments.

**Keywords** : Environmental Adaptive Robot(환경 적응형 로봇), Legged Robot(다족 로봇), Counterbalance Mechanism(중력 보상 장치), Mobile Robot(이동형 로봇)

### 1. 서 론

국내외 다양한 분야의 산업현장에서는 작업자

의 업무 효율을 높이고 안전한 작업이 가능하도록 로봇 기술을 개발하여 적용하고 있다. 과거에는 생산 및 제조업 등에서 로봇을 활용한 자동화에 관한 연구가 주로 수행되었으나<sup>[1,2]</sup> 근래에는 서비스업, 물류업, 농업, 의료업 등 사람과 로봇의 동시 작업이 필수적인 작업환경에서도 로봇 기술 연

# Corresponding Author : dueleldi@kro.re.kr, jbsong@korea.ac.kr

Lead Author : chang8052@korea.ac.kr

Tel: +82-54-820-2801, Fax: +82-54-820-2891

구가 활발하게 수행되고 있다. 특히, 유행성 전염병 등의 팬데믹 상황이 오래 지속됨에 따라 배송 및 운반과 같이 대체 가능한 대면 작업에 적용할 수 있는 로봇 기술에 대한 수요가 증가하고 있으며 이와 관련된 연구 또한 활발하게 수행되고 있다.

이러한 연구의 일환으로 음식점, 병원, 물류센터 등에서는 음식, 검체, 종이 상자 등 경량형 물체들의 운반을 위해 여러가지 형태의 이동형 운송 로봇<sup>[3-5]</sup>을 활용하여 반복적인 대면 업무를 대체하고 있다. 하지만 현재의 이동형 운송 로봇 기술은 실내의 정돈된 구동 환경에서만 운용이 가능하며 가벼운 물체 운반에 한정되어 있기 때문에 산업 전반에 걸쳐 적용하기 위해서는 실외의 복잡한 환경에서 운용이 가능하고 고하중 물체 운송이 가능한 로봇 기술 개발이 필수적이다. 비정형 환경에 적용하여 운용이 가능한 환경 적응형 로봇으로 뱀 로봇에 대해 연구된 바 있으나<sup>[6,7]</sup> 운송 및 운반에는 적합하지 않으며, 물체를 적재하고 비정형 환경에서 운용이 가능한 다족보행 로봇이 연구되기도 하였으나 운반 물체의 하중 또는 부피에 제한이 있거나<sup>[8,9]</sup> 센서, 배터리, 모터, 감속기 등 로봇의 구성 부품이 비싸고 무거워<sup>[10,11]</sup> 상용화가 어렵다는 단점이 있다. 따라서 보다 다양한 산업에서 비대면 운송 로봇을 적용하기 위해서는 로봇 플랫폼의 전력 효율을 고려하고, 저용량 모터와 저사양 감속기를 사용하면서도 가반하중 등의 로봇 사양을 만족시킬 수 있는 환경 적응형 로봇의 혁신적인 설계가 필요하다.

이를 위한 한 가지 방법은 기계식 중력보상 장치(counterbalance mechanism, CBM)를 사용하여 모터와 감속기로 구성된 로봇의 관절(구동)부 부담을 최소화 하는 것이다. 중력보상 장치는 로봇 팔에 주로 적용되었던 연구주제로 로봇 팔의 자중에 의한 중력토크를 상쇄하여 구동에 필요한 토크를 절감시키는 장치로서, 일반적으로 스프링의 복원력을 이용하여 보상토크를 생성하는 구조로 구성되어 있다. 특히 대부분의 로봇은 구동시 가감속이 크지 않고, 원심력 및 코리올리 효과에 의한 영향이 나타날 정도로 관절이 빠르게 움직이지 않기 때문에 중력보상에 의한 효과가 극대화 된다.

이러한 중력보상 장치의 활용도를 높이기 위해 중력보상을 적용할 수 있는 관절의 종류를 확장하기 위한 연구<sup>[12]</sup>, 중력보상의 효과를 다자유도 관절에 적용한 로봇 팔에 관한 연구<sup>[13,14]</sup>, 경량, 저가형 다자유도 중력보상이 적용된 로봇 팔에 관한 연구<sup>[15]</sup> 등이 수행되었다. 하지만 기존의 연구들은 로봇 베이스가 지면에 고정되어 있는 로봇 팔에 대해서만 수행되었기 때문에 로봇 베이스가 계속해서 변화하는 이동 로봇에 적용하기에는 한계가 있다.

본 연구에서는 비정형 환경에서 고하중 물체 운반이 가능한 4족 운송 로봇에 적용 가능한 2자유도 로봇 다리의 구조를 제안하고, 제안하는 2자유도 로봇 다리에 적합한 중력보상 장치의 구조를 제안하였다. 제안하는 로봇 다리는 지면과 닿는 부분을 바퀴로 구성하여 기동성을 높였고, 다리가 어떠한 위치에 있더라도 바퀴와 지면이 이루는 각도가 항상 일정하도록 설계되었다. 또한 중력보상 장치는 경량, 저가형으로 모듈화 설계 되고 플랫폼의 베이스에 위치시켜 로봇 구성의 편의성을 높였다.

본 논문은 다음과 같이 구성된다. 2장에서 중력보상 장치의 원리와 로봇 다리에 적용하는 중력보상 장치 구조의 타당성에 대하여 설명하고, 3장에서 중력보상 장치가 적용된 환경 적응형 로봇의 다리 모듈의 구조에 대해 설명한다. 4장에서는 시뮬레이션과 실험을 통해 제안하는 중력보상 로봇 다리의 관절토크 감소 효과를 검증하고, 5장에서 결론을 도출한다.

## 2. 중력보상 장치

### 2.1 1자유도 중력보상 장치

[Fig. 1(a)]처럼 구성된 1자유도 링크의 질량이  $m$ , 무게중심까지의 거리  $l_c$ , 지면에 수직인 기준축  $y$ 와 링크 사이의 회전 각도가  $\theta$ 일 때, 관절에 인가되는 중력토크(gravitational torque)는 다음과 같다.

$$T_g = mgl_c \sin\theta \quad (1)$$

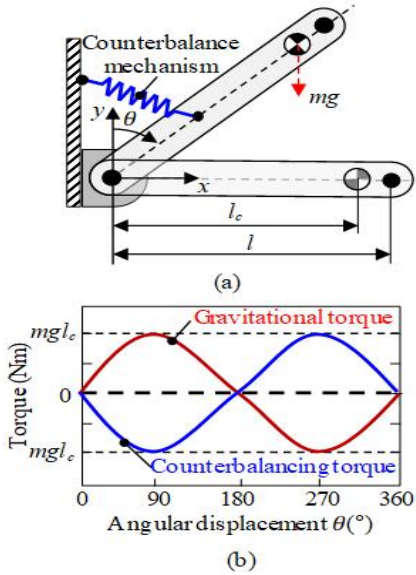


Fig. 1 Gravitational torque of a 1-DOF arm: (a) simplified model, and (b) torque as a function of  $\theta$

이러한 중력토크를 상쇄하기 위해서 중력보상 장치는 [Fig. 1(b)]와 같이 정현파로 표시되는 중력 토크와 크기는 같지만 위상이 반대인 보상토크 (compensation torque or counterbalancing torque)를 생성한다.

중력보상 장치를 로봇 팔에 적용한 기존의 연구들<sup>[12-17]</sup>에서는 다양한 수식과 메커니즘으로 보상 토크를 발생시키며, 크게 [Fig. 2(a)]의 슬라이더 크랭크 구조, [Fig. 2(b)]의 기어 유닛 구조 그리고 [Fig. 2(c)]의 와이어 구조 세 가지로 분류될 수 있다. 이러한 중력보상 장치들은 [Table 1]처럼 서로 다른 특징을 갖으며 각각 식 (2), (3), (4)를 만족하는 보상토크를 발생시킬 수 있다.

$$k_a \frac{R_a + l_{rod} - (R \cos \theta + l_{rod} \cos \phi_a) + s_0}{\cos \phi} R \sin(\theta + \phi) \quad (2)$$

$$\frac{k_b R_b^2}{4} \sin \frac{n}{2} \theta \quad (3)$$

$$bk_c (s_0 + c(\theta) - (b - a)) \frac{a \sin \theta}{c(\theta)} \quad (4)$$

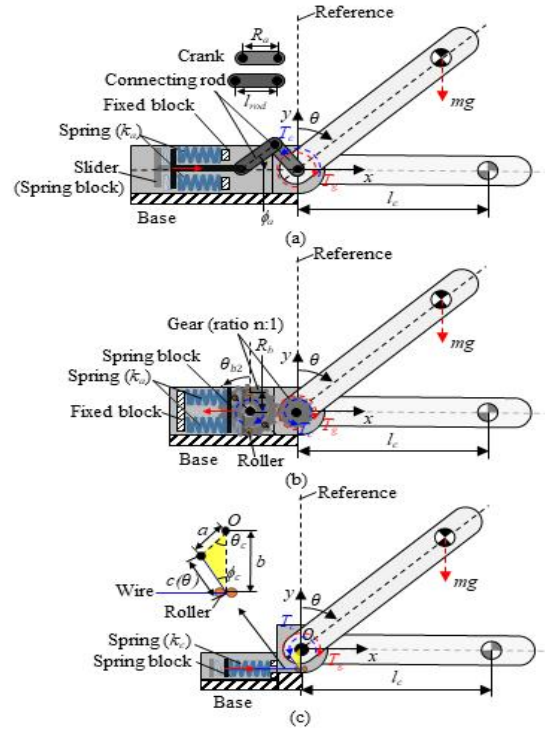


Fig. 2 Three different concepts of the CBMs: (a) slider-crank mechanism, (b) gear-roller mechanism and (c) wire-roller mechanism

또한 위의 식들은 [Table 1]의 조건식에 맞도록 설계변수를 선정하여 중력보상 장치를 설계하면 링크의 모든 회전 각도에 대해서 기계적인 평형을 유지할 수 있다<sup>[12-17]</sup>. 본 연구에서 제안하는 중력보상 로봇 다리는 구동되는 다리 링크의 무게를 최소화하고 중력보상 장치의 조립위치를 자유롭게 구성하기 위해 [Fig. 2(c)]의 wire-roller 구조를 적용하였다.

## 2.2 2중 구조의 1자유도 중력보상 장치

다자유도 로봇 팔의 경우에는 회전 관절의 다양한 회전 각도에 대해 중력보상을 적용하기 위해 중력보상 장치를 항상 지면에 수직한 기준면 (reference)에 설치하고, 서로 다른 관절에 영향을 미치는 정현파를 상쇄시키는 구조가 적용되어 왔다<sup>[12-15]</sup>. 하지만 환경 적응형 로봇의 이동형 플랫폼

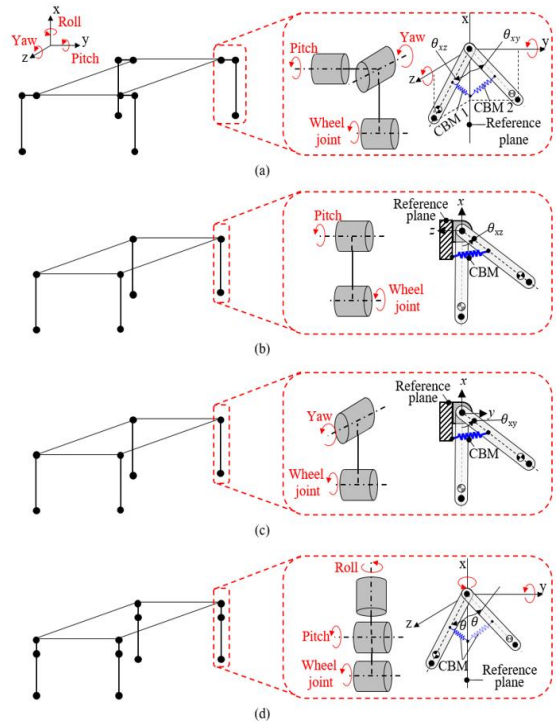
**Table 1** The characteristics of the CBM in [Fig. 2]

Concept	[Fig.2(a)] Slider-crank	[Fig.2(b)] Gear-roller	[Fig.2(c)] Wire-roller
Counterbalancing torque $T_c$	Eq. (2)	Eq. (3)	Eq. (4)
Design variables	$k_a, l_{rod}, R_a, s_0$	$k_b, R_b, n$	$k_c, a, b$
Conditional equation	$l_{rod} \gg R_a$ $R_a + s_0 = l_{rod}$	$n = 2$	$s_0 = b - a$
Spring constant	$\frac{mgl_c}{R_a l_{rod}}$	$\frac{4mgl_c}{R_b^2}$	$\frac{mgl_c}{ab}$
Components	Crank Rod Springs Spring block Linear guide	Two gears Roller Springs Spring block Linear guide	Wire Roller Spring(s) Spring block Linear guide
Assembly location	Link, Near base (limited)	Link, Near base (limited)	Link, Near base (unlimited)
Comparative weight	Heavy	Heavy	Light

\*  $s_0$ : Initial compression of the spring

폼은 여러 개의 다리와 바퀴로 구성되어 여자유도를 갖기 때문에 환경 적응을 위한 다리의 제어에 다양한 해가 존재한다. 따라서 단순히 다수의 중력보상 장치를 로봇 다리의 각 관절에 설치하여도 중력보상 장치의 효과를 극대화 시킬 수 있는 제어가 가능하다. 또한 이러한 2중 구조의 1자유도 중력보상 장치를 로봇 다리에 적용하면 다자유도 중력보상 장치를 위한 추가적인 구조 없이도 설계가 가능하기 때문에 전체 시스템의 무게와 부피를 최소화할 수 있다.

본 연구에서는 [Fig. 3(a)]처럼 1개의 피치(pitch) 관절과 1개의 요(yaw)관절로 구성된 로봇 다리에 2중 1자유도 중력보상 장치를 적용하였다. 이러한 구조는 다양한 환경 적응형 로봇으로의 확장을 고려한 구조이며, 1자유도 중력보상 장치를 1중 구조로만 적용한다면 [Fig. 3(b)]의 1개의 피치 관절을 갖는 로봇 다리, [Fig. 3(c)]의 1개의 요 관절을 갖는 로봇 다리, 그리고 [Fig. 3(d)]의 1개의 롤(roll) 관절과 1개의 피치(요) 관절을 갖는 로봇 다리에도 적용이 가능하다.



**Fig. 3** Various leg structure of the environmental adaptive robots with CBM: (a) 2-DOF(pitch-yaw) leg, (b) 1-DOF(pitch) leg, (c) 1-DOF(yaw) leg and (d) 2-DOF(roll-pitch) leg

### 3. 환경 적응형 로봇의 다리 모듈

#### 3.1 환경 적응형 로봇 다리 구조

[Fig. 4]는 [Fig. 3(a)]의 다리 구조를 상세 설계한 모습이다. 로봇 다리는 2개의 회전 관절과 1개의 바퀴 구동관절로 구성되며, 바퀴는 피치 관절과 요 관절의 구동시 지면과의 마찰을 최소화하고 다양한 조향 제어가 가능하도록 옴니 휠(omni wheel)로 구성된다. 또한 로봇 다리의 링크 구조는 효율적인 제어를 위해 벨트-폴리 기반의 평행사변형 기구를 적용하여 구성되어 바퀴 구동부와 이동형 플랫폼이 항상 같은 방향을 향한다.

제안하는 로봇 다리가 적용된 이동형 플랫폼은 다리의 관절 각도에 따라 [Fig. 5]처럼 다양한 형

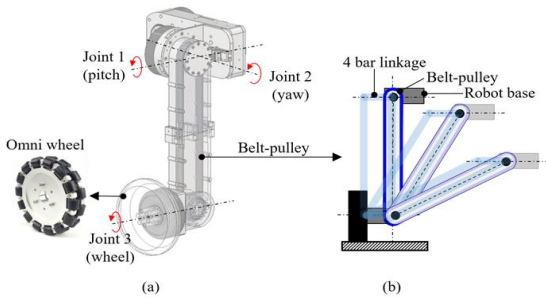


Fig. 4 Leg structure for the environmental adaptive robots: (a) detailed design and (b) parallelogram mechanism of the wheel & platform based on belt-pulley

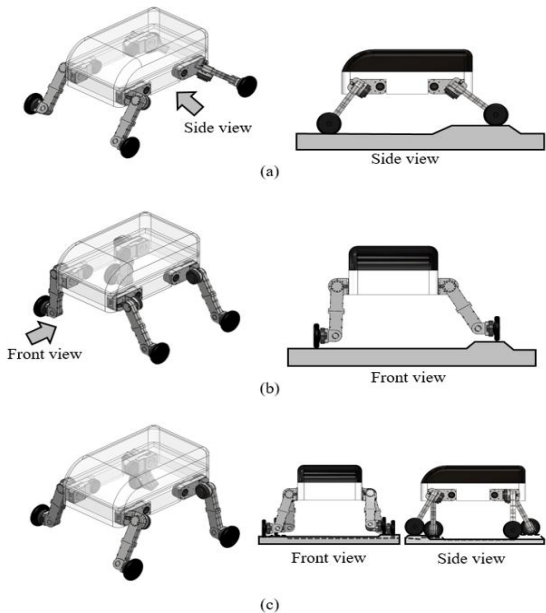


Fig. 5 Various postures of the mobile platform with the proposed robot leg: when (a) only the pitch joints are driven, (b) only the yaw joints are driven and (c) the pitch-yaw joints are driven independently

대로 이동할 수 있으며 [Fig. 5(a)], [Fig. 5(b)] 그리고 [Fig. 5(c)]처럼 피치 관절 또는 요 관절이 독립적으로 움직일 때 중력보상 장치의 효과를 극대화할 수 있다. 실외 환경에 적응하여 구동되는 기

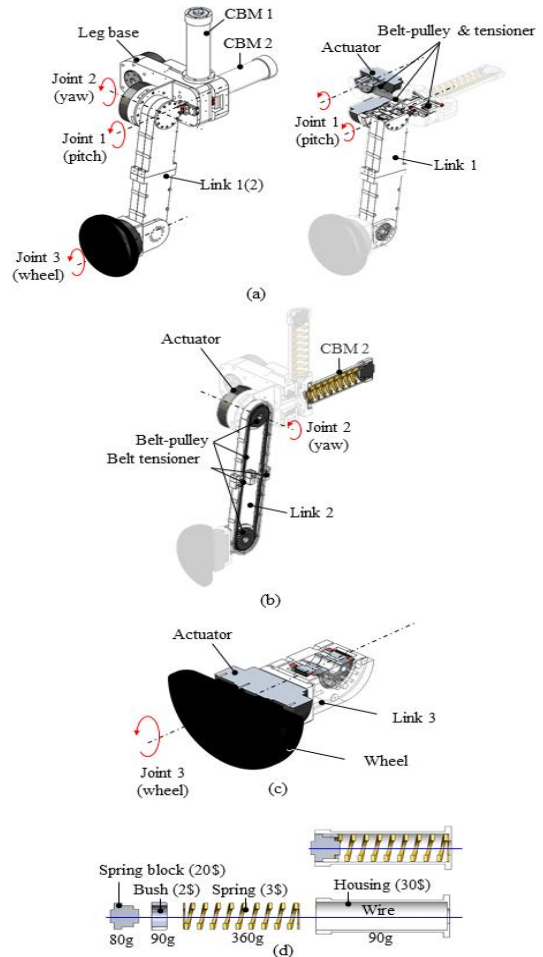


Fig. 6 Prototype of the proposed counterbalance robot leg: structure of the (a) joint 1 & link 1, (b) joint 2 & link2, (c) wheel & link3 and (d) CBM

존의 이동형 로봇들이 1자유도 피치 관절 혹은 1자유도 요 관절의 다리 구조로도 일정 수준의 환경 적응 제어가 가능하기 때문에<sup>[18,19]</sup>, 제한하는 로봇 다리 구조와 중력보상 장치를 활용하면 더 효과적인 환경 적응 제어가 가능할 것으로 기대된다.

### 3.2 중력보상 기반의 2자유도 로봇 다리 모듈

[Fig. 6]은 3장 1절에서 제안한 환경 적응형 로봇 다리 구조에 2중 중력보상 장치를 적용하여 모

들화 설계한 2자유도 로봇 다리 시제품이다. 각 관절과 링크는 [Fig. 6(a)], [Fig. 6(b)] 그리고 [Fig. 6(c)]와 같이 구성되며, 중력보상 장치는 로봇 링크가 아닌 베이스에 쉽게 탈부착이 가능하도록 설계되었기 때문에 중력보상 장치의 유지 보수가 용이하고, [Fig. 6(d)]와 같이 경량, 저가형으로 설계되어 로봇의 무게, 부피 그리고 제작비용을 최소화할 수 있다.

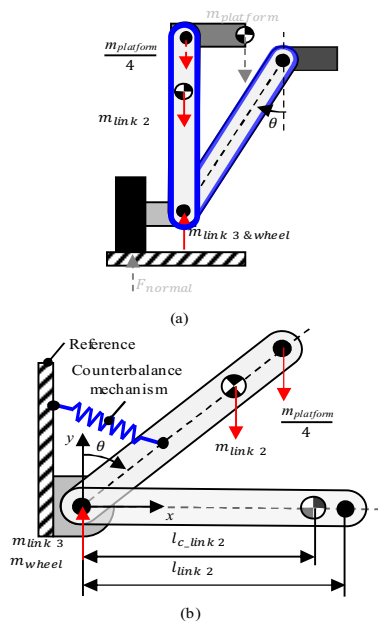


Fig. 7 Simplified diagrams: the kinematics of (a) the robot leg into (b) a robot arm

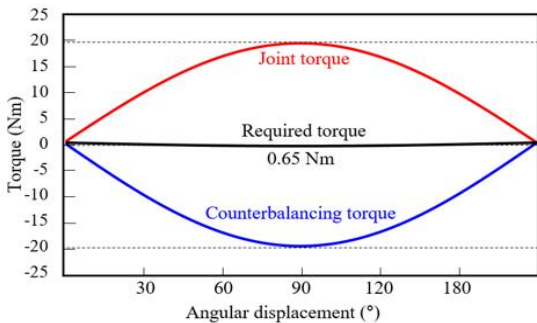


Fig. 8 Torque simulation results of double 1-DOF CBM: joint 1 (CBM 1) and joint 2 (CBM 2)

[Fig. 7]은 [식 (4)]의 중력보상 장치 변수 설계를 위해 로봇 다리의 기구학을 로봇 팔 형상으로 단순화한 그림이다. 이동형 플랫폼의 무게중심은 중심에 가깝게 설계되기 때문에, 로봇 다리 하나에 작용하는 힘은 [Fig. 7(a)]처럼 단순화 할 수 있다. 이때, 링크에 적용된 벨트-폴리 기반의 평행사변형 구조<sup>[15]</sup>와 플랫폼을 지지하는 다른 다리에 의해 서로 상쇄되는 힘을 제외하면 바퀴(wheel) 및 바퀴구동부가 포함된 링크(link 3)의 무게는 구동 관절의 중력토크에 영향을 미치지 않으며, 결과적으로 로봇 다리에 필요한 중력토크 및 보상토크는 [Fig. 7(b)]처럼 로봇 팔의 형상으로 구할 수 있다.

[Fig. 8]은 제안한 중력보상 장치의 중력토크, 보상토크 및 그 차이에 대한 시뮬레이션 결과를 나타낸다. 제안하는 구조에서는 피치 관절과 요 관절의 회전 중심이 일치하기 때문에 두 관절에 필요한 보상토크가 동일하다. 시뮬레이션에 사용된 2자유도 로봇 다리와 중력보상 장치 설계에 적용된 설계 변수 값은 [Table 2]에 정리하였으며, 이는 설계된 중력보상 로봇 다리 시제품의 CAD 데이터로부터 수집되었다. 중력보상 장치는 로봇의 자중과 더불어 최대 가반하중 40kg의 절반인

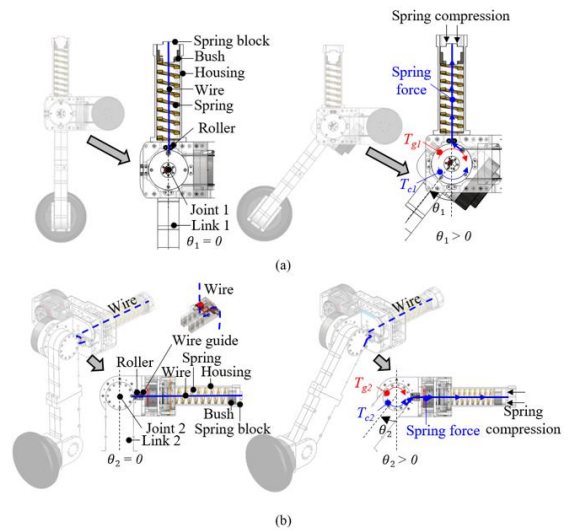


Fig. 9 Operation of the double 1-DOF CBM in the proposed robot leg: mechanism of (a) CBM 1 and (b) CBM 2



**Table 2 Design Parameters for CBM in [Fig. 3(a)]**

	Joint 1,2 (pitch-yaw)
Link length llink 2	300 mm
Center of mass lc_link 2	176 mm
Link mass mlink	1.0 kg
Platform mass mplatform	24 kg
Initial com. s0 in Eq. (4)	10 mm
Distance a in Eq. (4)	30 mm
Distance b in Eq. (4)	40 mm
Spring constant k	16.7 kN/m

20kg을 함께 보상하도록 설계되었다. 두 관절에서의 중력토크 최대값은 동일하게 20Nm로 계산되며, [Fig. 8]에서 중력보상 장치에 의해 생성된 보상토크에 의해 두 관절에 인가되는 대부분의 중력토크가 보상됨을 알 수 있다.

[Fig. 9]는 로봇 다리에 설치된 중력보상 장치 1과 2의 배치를 보여주며, [Fig. 9(a)]와 같이 피치 관절이 회전할 때와 [Fig. 9(b)]와 같이 요 관절이 회전할 때 와이어가 중력보상 장치의 스프링을 적절하게 압축하여 각 관절의 중력토크를 보상할 수 있다. 결과적으로 플랫폼 무게 35kg(플랫폼 4kg, 가반하중 20kg, 4개의 다리 4kg, 4개의 바퀴 구동부 7kg)의 단 3.5%(1.2kg)에 해당하는 2중 중력보상 장치를 로봇 다리에 적용하면 동일한 모터를 사용하더라도 높은 전력 효율과 큰 가반하중을 갖는 이동형 로봇의 설계가 가능하다.

## 4. 동역학 시뮬레이션 및 실험

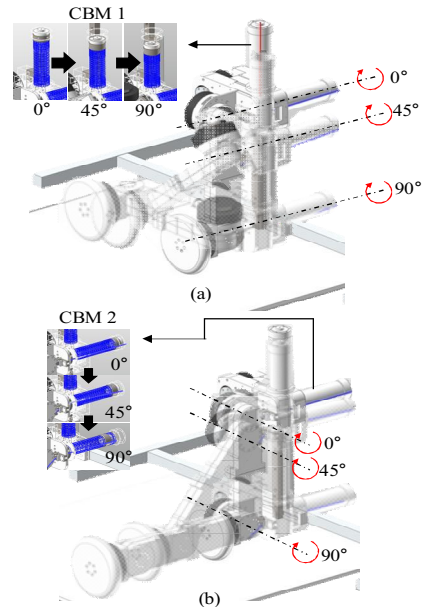
### 4.1 동역학 시뮬레이션

3장에서 제안한 중력보상 로봇 다리의 메커니즘과 성능 검증을 위해 [Fig. 10]과 같이 RecurDyn 프로그램상에서 동역학 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션 환경에서 이동형 플랫폼은 LM 가이드에 부착되어 중력 방향의 하중만 인가되도록 구성되었으며 바퀴가 옴니 휠임을 고려하여 지면과의 마찰 계수를 0으로 설정하였다. 로봇 플랫폼의 관절 1과 관절 2는 각각 [Fig. 10(a)]과 [Fig. 10(b)]에

서처럼 최고 속도 60%/s, 가감속 시간 0.5s의 조건으로 90°만큼 이동하였다가 초기자세인 0°로 돌아가도록 구동된다. 2중 1자유도 중력보상 장치는 와이어와 스프링을 구현하여 실제 시제품과 최대한 유사하게 구성하였다.

위의 조건으로 시뮬레이션을 수행했을 때 CBM의 유무에 따른 관절 1과 관절 2의 부하 해석 결과를 [Fig. 11(a)]와 [Fig. 11(b)]에 나타내었다. 중력보상 장치가 없을 때 관절 1과 관절 2는 회전 각도 90°에서 최대 중력토크 19Nm가 인가되며, 중력보상 장치가 있을 때는 약 2.8Nm의 토크만 필요하였다. 중력보상 장치내 스프링의 압축 거리는 CBM 1에서 39.89mm, CBM 2에서 39.41로 wire-roller 기반의 중력보상 장치를 [Table 2]와 같이 설계했을 때 필요한 최대 압축거리 40mm와 비교했을 때 각각 0.3%, 1.5%의 오차를 보였다.

결과적으로 제안하는 로봇 다리에 2중 1자유도 중력보상 장치를 적용하여 관절 구동시 필요한 부하의 최대 85%의 토크 절감효과를 확인할 수 있었으며, 이는 실제로 로봇 시제품을 제작할 때 고려될 수 있는 와이어와 롤러 사이 간격에 의한 오



**Fig. 10 Simulation environmental setup in RecurDyn: (a) joint 1 and (b) joint 2**

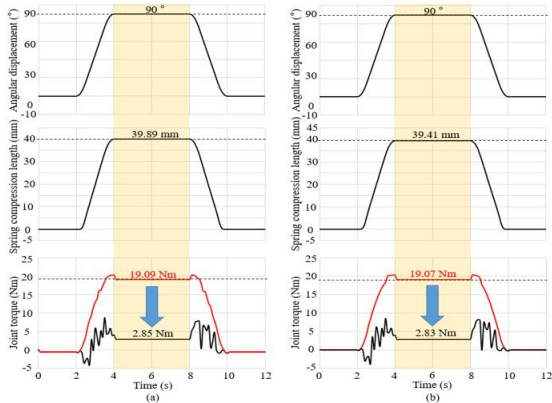
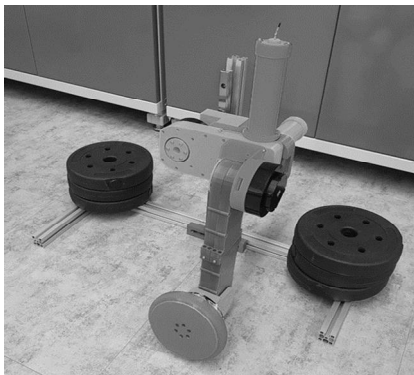
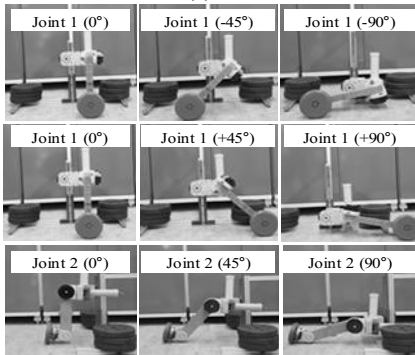


Fig. 11 Simulation results: Angular displacement, spring compression length in CBM 1, 2 and joint torque of (a) joint 1 and (b) joint 2



(a)



(b)

Fig. 12 Verification of the effectiveness of the robot leg with double 1-DOF CBM: (a) experimental setup and (b) maintaining various posture of the proposed counterbalance robot leg

차, 와이어의 신축에 의한 오차 그리고 링크 간 무게 중심과 작용점의 오차가 반영된 결과로 볼 수 있다.

## 4.2 시제품 제작 및 중력보상 메커니즘 검증

본 연구에서는 제안하는 중력보상 로봇 다리의 중력보상 장치로 인한 토크 상쇄 효과를 검증하기 위해 [Table 2]의 설계를 만족하는 시제품을 제작하여 [Fig. 12(a)]와 같이 실험 환경을 구성하였다. 로봇 다리에 중력보상 장치를 적용함으로써 [Fig. 12(b)]처럼 관절 1과 관절 2의 각도 변화에 따라 형성되는 로봇 다리의 다양한 자세를 유지할 수 있는 것을 확인할 수 있다.

## 5. 결론

본 연구에서는 환경 적응형 로봇에 적합한 로봇 다리구조를 제안하였으며, 2중 1자유도 기계식 중력보상 장치가 적용된 2자유도 중력보상 로봇 다리를 개발하였다. 시뮬레이션과 실험을 통하여 중력보상 장치의 성능을 검증하였으며, 중력보상 로봇 다리의 관절 부하 감소 효과를 확인하였다. 이러한 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1. 동일한 가반하중과 로봇의 동작에 대해서, 중력보상 장치의 장착 시에는 미장착 시에 비해서 최대 85%정도 관절 부하가 감소하였으며, 이에 따라 동일한 모터로 높은 가반하중과 갖는 다양한 형태의 이동형 플랫폼 설계가 가능하다.
2. 제안된 2자유도 로봇 다리는 단지 1.2kg의 무게를 갖는 2중 1-DOF 중력보상 장치를 적용하여 35kg의 이동형 플랫폼의 다양한 자세를 유지할 수 있기 때문에 실외 비정형 환경에서 전류를 최소화하는 효율적인 제어가 가능하다.
3. 제안된 중력보상 장치의 장착으로 기존의 고용량 모터 및 고사양 감속기 대신에 저용량 모터 및 저사양 감속기의 사용이 가능하게 되어, 유사한 가반하중과 작업 반경을 갖는 다른 로봇 다리에 비해서 제작 단가를 획기적으로 절감할 수 있다.

## 후 기

“본 결과물은 농림축산식품부의 재원으로 농림식



품기술기획평가원의 첨단생산기술개발사업 및 첨단 농기계산업화기술개발사업, 기술사업화지원사업, 노지분야스마트농업기술단지화고도사업의 지원을 받아 연구되었음 (317072-04, 320028-03,122053-03,322041-02).”

## REFERENCES

1. Park, C. H. and Park, K. T., “Design and Control of Industrial Dual Arm Robot”, *Journal of the Korea Society for Precision Engineering*, Vol. 25, No. 11, pp. 58-65, 2008.
2. Hong, J. R., Jo, H. M., Chung, W. J., Park, S. K. and Noh, S. H., “Implementation of a 2-axis Additional Axes Strategy on a 6-axis Articulated Robot for Improving Welding Process Efficiency”, *Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers*, Vol. 16, No. 6, pp. 55-62, 2017.
3. Takahashi, M., Suzuki, T., Cinquegrani, F., Sorbello, R. and Pagello, E., “A Mobile Robot for Transport Applications in Hospital Domain with Safe Human Detection Algorithm”, 2009 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, Guilin, China, pp. 1543-1548, 2009.
4. Fracapane, G., Koster, R., Sgarbossa, F. and Strandhagen, J. O., “Planning and control of autonomous mobile robots for intralogistics: Literature review and research agenda”, *European Journal of Operational Research*, Vol. 294, No. 2, pp. 405-426, 2021.
5. Yamamoto, T., Terada, K., Ochiai, A., Saito, F., Asahara, Y. and Murase, K., “Development of Human Support Robot as the research platform of a domestic mobile manipulator”, *ROBOMECH Journal*, Vol. 6, No. 4, 2019.
6. Zhang, D., Yuan, H. and Cao, Z., “Environmental Adaptive Control of a Snake-like Robot With Variable Stiffness Actuators”, *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, Vol. 7, No. 3, pp. 745-751, 2020.
7. Shin, H. C., Kim, C. H. and Lee, H. H., “Development of a Snake Robot for Unstructured Environment”, *Journal of Korea Robotics Society*, Vol. 8, No. 4, pp. 247-255, 2013.
8. Nygaard, T. F., Martin, C. P., Samuelsen, E., Torresen, J. and Glette, K., “Real-world evolution adapts robot morphology and control to hardware limitations”, *GECCO '18: Proceedings of the Genetic and Evolutionary Computation Conference*, Kyoto, Japan, pp. 125-132, 2018.
9. Odashima, T., Luo, Z. and Hosoe, S., “Hierarchical control structure of a multilegged robot for environmental adaptive locomotion”, *Artif Life Robotics*, Vol. 6, pp. 44-51, 2002.
10. Park, H. W., Wensing, P. M. and Kim, S. B., “High-speed bounding with the MIT Cheetah 2: Control design and experiments”, *The International Journal of Robotics Research*, Vol. 36, No. 2, pp. 167-192, 2017.
11. Hutter, M., Gehring, C., Jud, D., Lauber, A., Bellicoso, C. D., Tsounis, V., Hwangbo, J., Bodie, K., Frankhauser, P., Bloesch, M., Diethelm, R., Bachmann, S., Melzer, A. and Hoepflinger, M., “ANYmal - A Highly Mobile and Dynamic Quadrupedal Robot”, 2016 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Daejeon, Korea, 2016.
12. Mun, B. Y., “Development of Counterbalance Mechanism and Robot Manipulator Applicable to Complex Joints”, M.S thesis, Korea University, Seoul, Korea, 2018.
13. Kim, H. S. and Song, J. B., “Multi-DOF Counterbalance Mechanism for a Service Robot Arm”, *Multi-DOF Counterbalance Mechanism for a Service Robot Arm*, *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, Vol. 19, No. 6, pp. 1756-1763, 2014.
14. Kim, H. S., Min, J. K. and Song, J. B., “Multiple-Degree-of-Freedom Counterbalance Robot Arm Based on Slider-Crank Mechanism and Bevel Gear Units”, *IEEE Transactions on Robotics*, Vol. 32, No. 1, pp. 230-235, 2016.
15. Park, H. C., Ahn, K. H., Min, J. K. and Song, J. B., “5 DOF Home Robot Arm based on

- Counterbalance Mechanism”, Journal of Korea Robotics Society, Vol. 15, No. 1, pp. 48-54, 2020.
16. Song, S. W. and Song, J. B., “Development of a 5 DOF Manipulator for Weight Handling based on Counterbalance Mechanism”, Journal of Korea Robotics Society, Vol. 11, No. 4, pp. 242-247, 2016.
  17. Ahn, K. H. and Song, J. B., “6 DOF Industrial Robot Based on Multi-DOF Counterbalance Mechanism”, Journal of Korea Robotics Society, Vol. 12, No. 1, pp. 11-18, 2017.
  18. Yonhap, “LG Electronics unveils indoor-outdoor delivery robot”, The Korea Herald, [Online], <http://www.koreaherald.com/view.php?ud=20210713000243>, Accessed: July 13, 2021
  19. Cristina, M., “Japanese-Made Autonomous Robot Is a Four-Wheeled Explorer With Impressive Motor Skills”, auto evolution, [Online] <https://www.autoevolution.com/news/japanese-made-autonomous-robot-is-a-four-wheeled-explorer-with-impressive-motor-skills-178551.html>, Accessed: January 7, 2022.