

기어유닛 기반 중력보상장치를 갖는 머니플래이더

강인호* · 김휘수* · 송재복** · 이현수** · 장인성**

* 고려대학교 기계공학부, ** 현대자동차 그룹

Manipulator Equipped with Counterbalance Mechanism Based on Gear Unit

In Ho Kang^{*}, Hwi Su Kim^{*}, Jae-Bok Song^{**†}, Hyun Soo Lee^{**} and In Sung Chang^{**}

^{*} School of Mechanical Engineering, Korea Univ.

^{**} Hyundai motor Group.

(Received October 15, 2013 ; Revised December 10, 2013 ; Accepted December 11, 2013)

Key Words: Industrial Manipulator(산업용 로봇)Gravity Compensation(중력보상), Counterbalance Mechanism(중력보상장치)

초록: 일반적으로 산업용 로봇은 가반중량에 비해서 매우 큰 자중을 가지게 되며, 이로 인한 큰 중력토크를 보상하여야 하므로, 고사양의 모터/감속기를 사용하게 되어 제조단가가 높아진다. 이러한 머니플래이더의 자중 및 가반중량을 기계식 중력보상장치로 보상하게 된다면, 모터/감속기 사양을 크게 낮추어서 제조단가를 낮출 수 있다. 그러나 기존의 와이어 기반의 중력보상장치의 경우, 내구성 및 파손 등의 문제로 실용성이 낮았다. 본 연구에서는 이를 개선하고자 기어 및 롤러 기반의 내구성 높은 중력보상장치를 개발하고, 이를 사용하여 낮은 용량의 모터/감속기로도 가반하중 목표를 만족시킬 수 있는 중력보상장치를 탑재한 머니플래이더를 개발하였다. 본 연구에서는 다양한 시뮬레이션 및 실험을 통하여 제안한 중력보상장치가 머니플래이더의 모든 자세에 대해서 중력에 대한 완전한 보상토크를 제공하였으며, 큰 가반하중에 대해서도 적절한 보상토크를 제공할 수 있음을 보였다.

Abstract: Industrial manipulators are usually heavy given the payloads they carry. Therefore, they require high-capacity servomotors and speed reducers, which leads to high costs. However, if manipulator weight could be compensated for using a counterbalance mechanism, the motors' and speed reducers' capacities could be minimized substantially. However, it is usually difficult to assure durability and reliability with the conventional wire-based counterbalance mechanism. Therefore, a more robust gear- and roller-based counterbalance mechanism is proposed in this study. A manipulator was developed using this mechanism; this manipulator maintains its performance even when using motors and reducers of lower capacities. The results of various simulations and experiments verified that the proposed mechanism provides the torque required to compensate for gravitational torque in any configuration and minimizes the torque required for supporting a large payload.

1. 서 론

로봇 머니플래이더는 사용 목적 및 관절의 구성에 따라 다양한 형태로 개발된다. 특히, 수직 다관절형 머니플래이더는 다른 형태의 머니플래이더에 비해 작업공간이 넓고, 활용성이 우수하여 다양한 분야에 적용되고 있다. 반면에, 작업을 위한 정지

및 이동 시에 로봇의 자중으로 인하여 각 관절에 큰 중력토크가 인가되어, 이를 부담할 수 있는 높은 용량의 감속기 및 모터를 필요로 한다. 그러나 이러한 고사양의 구성요소는 로봇의 제조단가를 향상시키는 주요 원인일 뿐만 아니라, 충돌 안전을 저해하는 원인이 되므로 사용되는 모터 및 감속기의 용량을 최소화하는 것이 바람직하다.

이를 위해서는 머니플래이더의 기존 성능을 유지하는 동시에 중력을 보상하는 데 필요한 토크를 낮출 수 있는 방법이 필요하다. 일반적으로 대응

† Corresponding Author, jbsong@korea.ac.kr

© 2014 The Korean Society of Mechanical Engineers

량 산업용 로봇의 경우, 첫째 피치(Pitch) 관절에 무게추 또는 가스스프링을 적용하여 자중에 의한 중력토크를 감소시킨다.^(1,2) 그러나 이 방법은 로봇 전체의 하중을 증가시키므로 이동성 및 인간-로봇 협업시의 충돌 위험성을 증가시킨다. 이를 해결하기 위하여 스프링을 사용한 다양한 중력보상장치가 제안되었다. 고려대에서는 스프링과 와이어 기반의 다자유도 중력보상장치와 이를 탑재한 머니플레이터를 개발하였다.⁽³⁾ 또한, 캐나다의 LAVAL 대학에서는 무게추와 와이어를 사용하여 10kg 이상의 물체를 들어올릴 수 있는 중력보상 머니플레이터를 개발하였다.⁽⁴⁾ 환자 재활기구 및 2족로봇의 다리에 탑재하기 위한 다양한 중력보상장치가 일본, 유럽 등지에서 개발되고 있다.^(5,6)

그러나 기존에 개발된 중력보상장치의 경우, 대부분 와이어를 사용하여 스프링을 압축시켜서 보상토크를 생성하는 방식이므로, 와이어의 변형 및 파손 등에 따른 안전성 및 내구성에 대한 문제가 지속적으로 제기되었다. 본 연구에서는 이러한 문제를 해결하고자, 비교적 내구성과 신뢰성이 높은 기어와 롤러 등의 기계요소를 사용한 중력보상장치를 제안하였다. 이를 통하여 로봇의 구동에 필요한 토크를 최소화하여 저용량의 모터 및 감속기로도 로봇을 구성할 수 있으므로, 로봇 가격의 저하를 가져올 수 있다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 로봇에 인가되는 중력토크 및 이를 보상하기 위해 개발된 중력보상장치에 대하여 설명한다. 또한 3장에서는 중력보상장치를 탑재한 다자유도 머니플레이터의 설계에 대하여 설명한다. 또한 4장에서는 다양한 시뮬레이션 및 실험을 통해서 제안한 중력보상장치의 성능을 검증한다. 마지막으로, 5장에서 결론을 내린다.

2. 중력보상장치의 개발

2.1 중력토크

머니플레이터의 운동방정식은 다음과 같이 주어진다.

$$\tau = M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + g(q) \quad (1)$$

여기서 q 는 관절변수, M 은 관성행렬, C 는 코리올리력과 원심력을 나타내는 행렬, g 는 중력벡터, τ 는 관절토크이다. Fig. 1은 0~2 kg의 가반하중이 인가된 6자유도 머니플레이터의 각 관절이 90°/s의 속도로 회전한다고 가정하였을 때, 각 피치관절(관

절 2와 3)에 대한 부하해석 결과이다. Fig. 1(b)에서 보듯이, 머니플레이터의 자중으로부터 발생하는 중력토크가 관절토크의 대부분을 차지하게 된다. 그러므로, 이러한 중력토크를 관절토크가 아니라 다른 기계적인 수단으로 적절히 보상한다면, 머니플레이터에 필요한 관절에서의 모터토크를 현저하게 낮출 수 있으므로, 저사양의 모터 및 감속기로도 기존의 작업을 수행할 수 있는 머니플레이터를 구현할 수 있다.

Fig. 2(a)와 같이 무게 m , 무게중심까지의 거리 l 인 링크로 구성된 1자유도 기구의 관절에는 다음과 같이 중력토크 τ_g 가 인가된다.

$$\tau_g = mgl \sin \theta \quad (2)$$

이와 같은 링크의 경우, (a)와 같이 스프링을 장착하면 링크에 의한 중력토크와 스프링에 의한 보상토크가 정적인 평형을 이루는 특정한 위치에서 링크가 정지하게 된다. 그러나 Fig. 2(b)와 같이 중력토크는 링크의 회전각에 따라 변하므로, 어떠한 회전각에서도 그 각도에서의 링크에 의한 중력토크와 크기가 동일한 보상토크를 정확히 발생시켜주는 장치가 필요하게 된다.

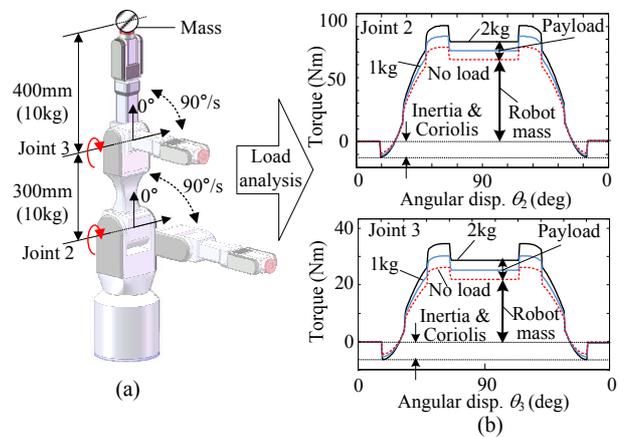


Fig. 1 Load analysis for 6-dof articulated manipulator: (a) simulation model and condition, (b) torques to operate joint 2 with a payload of 0 ~ 2 kg

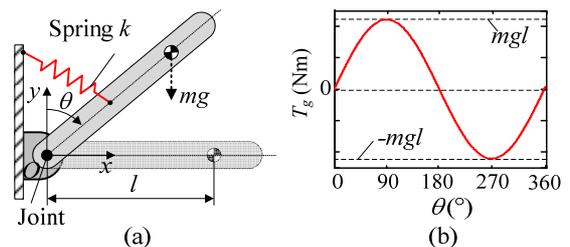


Fig. 2 Gravitational torque of 1-DOF link: (a) simplified model, and (b) torque as a function of θ

2.2 단일 자유도 중력보상장치

설계된 기어유닛 기반의 중력보상장치는 Fig. 3과 같이, 압축스프링과 스프링블록, 그리고 n 의 기어비를 갖는 두 개의 기어 및 기어상에 고정된 롤러로 구성된다. Fig. 3에서 링크가 θ_1 만큼 회전할 때, 링크에 고정된 기어 1에 의하여 기어 2가 반대 방향으로 θ_2 만큼 회전하게 된다. 이때, 기어 2의 회전중심으로부터 R 의 거리에 고정된 롤러가 강성 k 의 스프링을 압축시키므로 다음과 같이 힘 F_s 이 발생한다.

$$F_s = k R \sin \theta_2 \quad (3)$$

따라서 스프링의 압축력에 의하여 기어 2에는 다음과 같이 τ_2 가 발생한다.

$$\begin{aligned} \tau_2 &= F_s R \cos \theta_2 \\ &= k R^2 \sin \theta_2 \cos \theta_2 = \frac{k R^2}{2} \sin (2 \theta_2) \end{aligned} \quad (4)$$

또한 기어 1에는 기어비 n 에 의하여 τ_1 의 토크가 전달된다.

$$\tau_1 = \frac{k R^2}{2 n} \sin (2 \theta_2) \quad (5)$$

이때, τ_1 은 링크 1의 중력토크 $m g l \sin \theta_1$ 에 대한 보상토크로 작용하므로 완전한 중력보상을 위해서는 다음과 같은 관계가 성립하여야 한다.

$$m g l \sin \theta_1 = \frac{k R^2}{2 n} \sin (2 \theta_2) \quad (6)$$

따라서 $\theta_1 = 2 \theta_2$ (즉, $n=2$)라 가정하면, 양변의 sine 항이 모두 소거되어 중력토크를 완전히 보상할 수 있는 적절한 스프링은 다음과 같이 구할 수 있다.

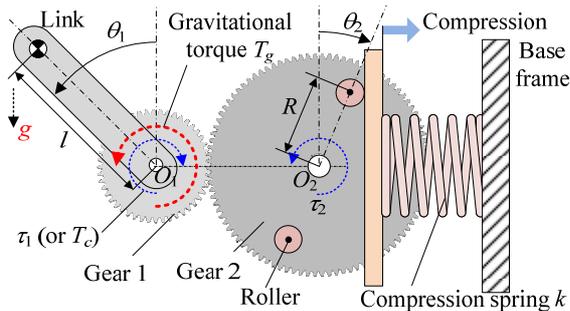


Fig. 3 Counterbalance mechanism based on gears and rollers

$$k = \frac{4 m g l}{R^2} \quad (7)$$

앞에서 선정된 기어비 및 스프링으로 구성된 중력보상장치는 Fig. 4와 같이 동작한다. 그림에서 보듯이, (a)와 같이 중력토크가 발생하지 않는 초기 위치($\theta=0^\circ$)에서는 스프링이 압축되지 않으므로, 보상토크 역시 발생하지 않는다. 반면에, 링크가 90° 회전하면, 가장 큰 중력토크가 발생하며, 이때 스프링의 압축력 F_s 과 모멘트암 $R \cos \theta$ 에 의하여 최대 보상토크가 발생한다. 또한, (d)의 경우와 같이 링크가 180° 에 위치하면 중력토크가 0되며, 이때 스프링이 최대로 압축되지만 모멘트암이 0이 되므로 보상토크는 발생하지 않는다.

3. 중력보상 머니플레이터 개발

본 연구에서는 앞에서 개발한 기어유닛 기반의 중력보상장치를 적용한 다자유도 머니플레이터를 개발하였다. 본 장에서는 개발된 머니플레이터 및 탑재된 중력보상장치의 설계에 대하여 설명한다.

3.1 중력보상 머니플레이터

본 연구에서는 제시한 기어유닛 기반의 중력보상장치에 대한 성능을 검증하고자 Fig. 5와 같이 요-피치-요-요-롤의 5자유도로 구성된 머니플레이터를 개발하였다. 머니플레이터의 사양은 Table 1과 같다. 이와 같은 구조의 머니플레이터의 경우, Fig. 6의 부하해석 결과에서 보듯이, 중력의 영향을 받는 피치관절(joint 2)에 매우 큰 토크가 인가

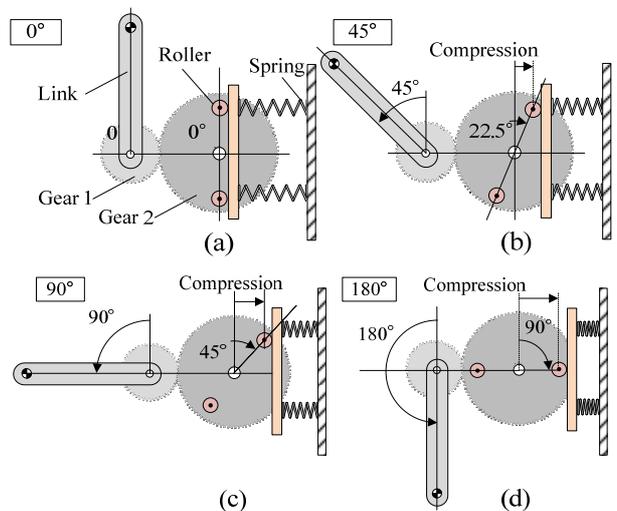


Fig. 4 Operation of counterbalance mechanism based on gear and roller when $\theta =$ (a) 0° , (b) 45° , (c) 90° , and (d) 180°

Table 1 Specifications of the manipulator

Specifications	
DOF	5 DOF
Payload	25 kg
Weight	80 kg
Arm length	1.35 m
Maximum speed	TCP 0.5 m/s

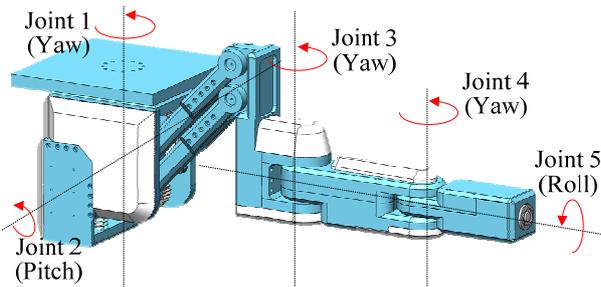


Fig. 5 Manipulator equipped with gravity compensation mechanism

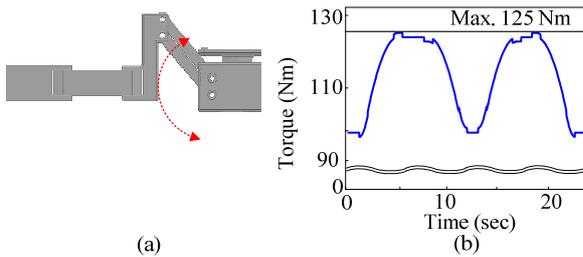


Fig. 6 Simulation of manipulator: (a) designed counterbalance mechanism, and (b) simulation results.

되므로, 일반적인 경우에는 충분한 토크를 제공하기 위하여 고사양의 모터 및 감속기 사용이 필요하다. 그러나 본 연구에서는 기어 유닛 기반의 신뢰성 높은 중력보상장치를 개발하여 머니플레이터의 피치관절에 탑재함으로써, 로봇의 자중으로부터 인가되는 중력토크를 보상하여 모터로부터의 토크를 최소화한다.

3.2 기어 유닛 기반의 중력보상장치

로봇의 자세 유지 및 동작 시에 가장 큰 토크가 인가되는 관절 2의 필요 토크를 최소화하기 위하여 Fig. 7과 같이 중력보상장치를 설계하였다. 또한 중력토크를 효과적으로 보상하기 위하여 Fig. 6의 시뮬레이션 및 식 (5)로부터 롤러의 위치($R = 0.1\text{ m}$) 및 스프링 강성($k = 50\text{ N/mm}$)을 선정하였다.

설계된 중력보상장치는 Fig. 8에서 보듯이, 링크의 회전에 의하여 관절에 고정된 기어 1이 회전하게 되고, 이에 따라 1:2의 기어비로 기어 2가 회전하게 된다. 또한, 기어 2에 고정된 롤러에 의하여 스프링이 일정량 압축되며, 이때 발생한 스프링

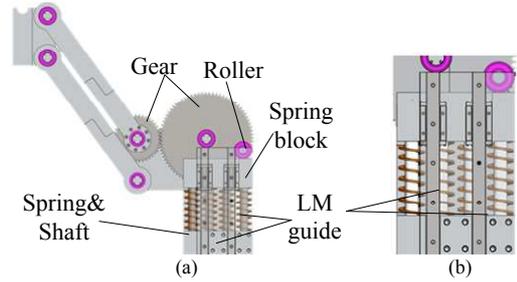


Fig. 7 Counterbalance mechanism for pitch joint (joint 2) of manipulator: (a) structure, and (b) spring guide

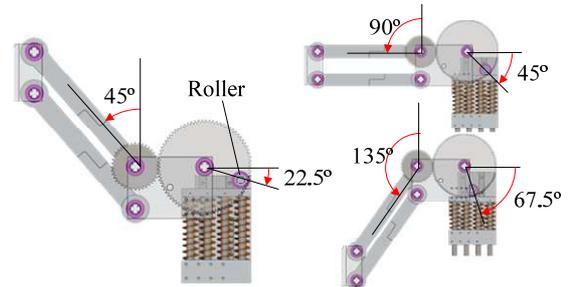


Fig. 8 Operation of counterbalance mechanism

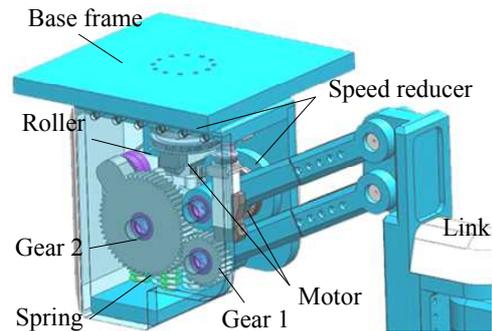


Fig. 9 Multi-DOF manipulator equipped with counterbalance mechanism based on gear and roller.

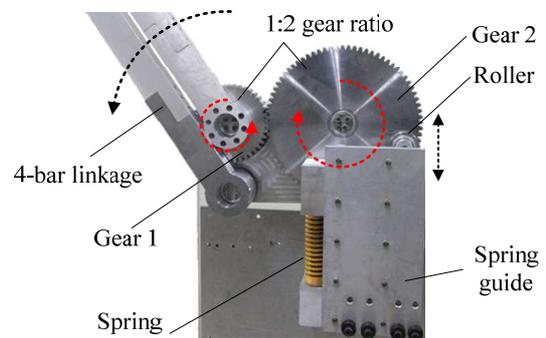


Fig. 10 Prototype of counterbalance mechanism

압축력에 의하여 중력토크가 보상된다. 본 설계에서는 스프링 압축 시에 좌굴을 방지하지 위하여 Fig. 7(b)와 같이 LM가이드를 설치하였으며, 유한요소해석을 통해서 충분한 용량을 갖는 롤러 및 베어링 등을 선정하였다. 또한 대부분의 부품은

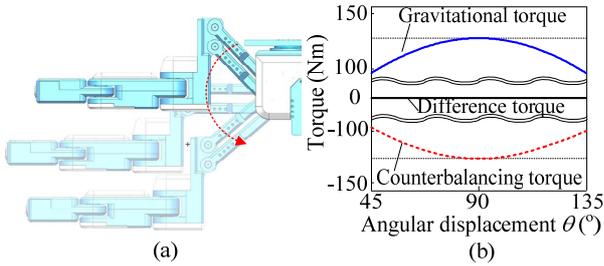


Fig. 11 Simulation of counterbalancing without external load: (a) simulation condition, and (b) simulation result

강도 및 무게를 고려하여 알루미늄 합금(6061T)으로 제작하였다. 개발한 중력보상장치를 머니플레이터에 탑재한 모습은 Fig. 9과 같다. 또한 중력보상장치의 성능평가를 위한 시제품이 Fig. 10과 같이 제작되었다.

4. 시뮬레이션 및 실험

4.1 시뮬레이션을 통한 성능 검증

개발된 중력보상장치의 성능을 검증하기 위하여 Fig. 11과 같이 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션 결과에서 볼 수 있듯이, 머니플레이터의 피치관절이 회전 가능 범위 내에서 상하로 이동할 때, 일반적으로는 최대 125 Nm의 중력토크가 관절에 인가됨을 알 수 있다. 그러나 본 연구에서 제안한 중력보상장치를 탑재하면 머니플레이터 자중으로부터 발생하는 중력토크를 완전히 보상하여, 머니플레이터 자세유지에 필요한 토크가 0이 됨을 알 수 있다.

다음으로, 실제 작업 시에 최대 가반하중 25kg이 인가된 상황에서의 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션 결과에서 볼 수 있듯이, 일반적으로는 머니플레이터 자중 및 가반하중으로부터 223Nm에 달하는 중력토크가 인가되므로, 이를 충분히 지지할 수 있는 고사양의 모터 및 감속기가 필요하다. 그러나 개발된 중력보상장치를 통하여 머니플레이터의 자중에 의한 중력토크를 보상하면, Fig. 12(b)와 같이 실제 필요 토크는 98Nm로 감소하면, 이 토크는 장착된 모터와 감속기에 의해서 충분히 제공된다. 그러므로, 머니플레이터 구성에 필요한 모터 및 감속기의 사양을 현저하게 낮출 수 있다.

4.2 실험을 통한 성능 검증

개발된 중력보상장치의 성능을 검증하고자, Fig. 13(a)와 같이 실험장치를 구성한 후, 링크를 45° ~ 135°까지 회전시켜 로드셀 및 엔코더를 사용하여 각도에 따라 인가되는 힘을 측정하였다. 또한 이

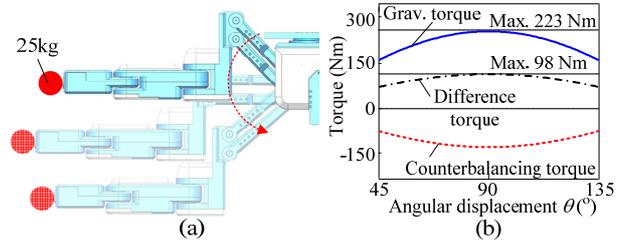


Fig. 12 Simulation of counterbalancing with external payload: (a) simulation condition, and (b) simulation results

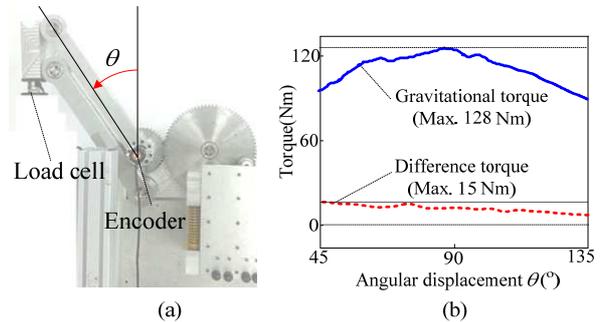


Fig. 13 Experiment of counterbalancing: (a) experimental setup, and (b) experimental results

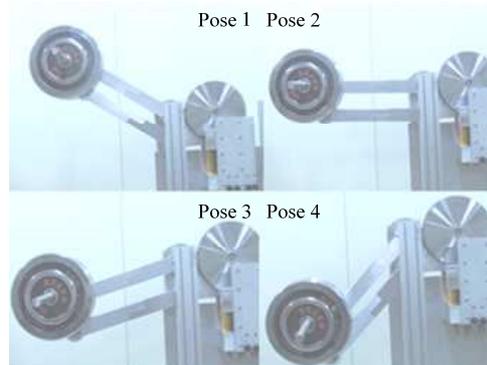


Fig. 14 Operations of counterbalance mechanism

를 모멘트 암을 고려하여 토크로 변환한 결과, (b)과 같이 최대 100Nm의 토크를 보상하는 것을 알 수 있다.

또한, Fig. 14과 같이 머니플레이터의 무게에 해당하는 30kg의 무게추를 링크에 인가한 결과, 별도의 모터 제어 및 감속기 없이도 모든 위치에서 정적 평형을 유지할 수 있음을 확인하였다.

5. 결론

본 연구에서는 로봇의 자중 및 회전 범위에 따라 인가되는 중력토크를 적절히 보상할 수 있는 기어유닛 기반의 중력보상장치를 개발하였다. 이를 통하여 로봇이 자세를 유지하거나 동작할 때

필요한 토크를 현저하게 낮출 수 있다. 또한 개발된 기어유닛 기반의 중력보상장치를 탑재한 다자유도 머니플레이터를 설계하였다. 다양한 시뮬레이션 및 실험을 통하여 개발된 중력보상장치의 성능을 검증하였다. 본 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

(1) 본 연구에서 개발된 중력보상장치를 감속기의 사양을 최소화할 수 있으므로, 로봇의 제작단가를 최소화할 수 있다.

(2) 본 연구에서는 기어유닛 기반의 중력보상장치를 제안함으로써, 기존 와이어를 사용한 중력보상장치의 내구성 및 신뢰성을 개선하였다.

후 기

본 연구는 현대엔지비의 지원으로 수행하는 산학협력의 및 산업통상자원부 융복합형 로봇인력 양성사업의 지원으로 수행되었음(NIPA-2012-H1502-12-1002).

참고문헌 (References)

- (1) <http://www.abb.com>
- (2) <http://www.yaskawa.com>
- (3) Kim, H. S. and Song, J. B., 2013, "Low-Cost Robot Arm with 3-DOF Counterbalance Mechanism," *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation 2013*, pp. 4168~4173.
- (4) Lacasse, M.-A., Leneviève, G., Boisclair, J., Ouellet, J. and Gosselin, C., 2013, "On the Design of a Statically Balanced Serial Robot Using Remote Counterweights," *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 4174~4179.
- (5) Shirata, S., Konno, A. and Uchiyama, M., 2007, "Design and Evaluation of a Gravity Compensation Mechanism for a Humanoid Robot," *IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and System*, pp. 3635~3640.
- (6) Nakayama, T., Araki, Y. and Fujimoto, H., 2009, "A New Gravity Compensation Mechanism for Lower Limb Rehabilitation," *IEEE Int. Conf. on Mechatronics and Automation*, pp. 943~948.