

로봇 설치면 자세 변화에 대응 가능한 자중 보상 기반 안전 매니플레이터도현민^{a*}, 김휘수^a, 김두형^a, 최태용^a, 박동일^a, 손영수^a**Safe Industrial Manipulator Based on a Counterbalancing Mechanism with Adaptation to the Posture Change of a Robot Base Plane**Hyun Min Do^{a*}, Hwi-Su Kim^a, Doo Hyeong Kim^a, Tae-Yong Choi, Dong Il Park, Youngsu Son^a^a Department of Robotics and Mechatronics, Korea Institute of Machinery and Materials, 156, Gajeongbuk-ro, Yuseong-gu, Daejeon 34103, Korea**ARTICLE INFO***Article history:*Received 12 October 2016
Revised 21 November 2016
Accepted 25 November 2016*Keywords:*Robot safety
Human-robot collaboration
Counterbalancing
Clamping force**ABSTRACT**

Guaranteeing the safety of human workers around robots has become an important issue with the increasing demand for human-robot collaboration in industrial production lines. This study proposes a robot manipulator equipped with a counterbalancing mechanism that reduces the power of actuators required to drive the robot, thus keeping a human worker safer in a human-robot collaborative environment. A counterbalancing torque that exactly cancels out the gravitational torque in the proposed mechanism is generated by restoring the force of a spring in the counterbalancing mechanism. A prototype design and experimental results are presented to verify the effectiveness of the proposed method.

1. 서론

기존의 자동차 산업 등 대량 생산 시스템에서 요구되던 생산 자동화의 수요는 최근 들어 짧은 모델 교체 주기 및 혼류 생산이 요구되는 소형 전자제품 분야로 확대되고 있다. 이러한 소형 전자제품 분야는 다품종 소량 생산이 요구되기 때문에 자동화 장치만으로는 다품종에 대응하기 위한 유연성이 부족하기 때문에 로봇이 반드시 필요한 요소이다¹⁻³⁾. 하지만 소형 부품의 핸들링 및 정밀한 조립작업 등이 요구되는 소형 전자제품의 특성상, 로봇만으로 생산 작업을 수행하기에는 아직 로봇 기술이 부족한 부분이 있다. 따라서 동일 셀 내에서 로봇과 사람작업자가 작업을 분담하여 수행하는 것이 적합한 방법이라고 할 수 있고, 이러한 인간-로봇 공존 생산에 대한 수요가 꾸준히 증가하고 있다⁴⁾.

인간과 로봇이 작업공간을 공유하는 데 있어서 가장 중요하고 반드시 해결해야 할 문제가 작업자의 안전 문제이다. 기존의 로봇 생산 시스템에서는 로봇을 안전 펜스로 분리하여 안전을 확보하였지만 동일 셀 내에서 인간과 로봇이 함께 작업하기 위해서는 로봇의 안전기능이 필수적이다. 이러한 안전 기능을 갖춘 로봇에 대한 다양한 연구가 이루어져 왔고, Universal Robots사의 UR 시리즈 등 상용 제품도 출시가 되고 있다⁵⁾. 기존 방법들은 대부분 충돌이 발생했을 때의 충격력을 감지하여 로봇을 정지시키는 능동적인 방법을 사용하고 있는데, 이러한 센서 기반의 능동적 안전 기능은 오작동 시 상해의 가능성이 존재한다⁶⁾. 따라서 충돌 발생 시 어떠한 상황에서도 최소한의 안전을 확보할 수 있는 근원적인 안전에 대한 필요성이 제기되고 있다.

로봇의 근원적인 안전을 확보하는 데 있어 가장 중요한 부분은

* Corresponding author. Tel.: +82-42-868-7507

Fax: +82-42-868-7135

E-mail address: hmido@kimm.re.kr (Hyun Min Do).

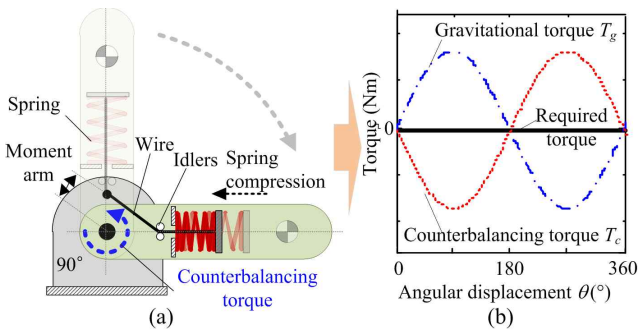


Fig. 1 Operational principle of generating the counterbalancing torque

로봇의 자중과 로봇의 구동 파워를 낮추어 충돌 시 충격력을 최소화하는 것이다. 국제표준인 ISO 10218^[7]은 산업용 로봇의 협동운전 조건에서의 안전 요구사항을 정의하고 있는데, 주요사항 중 하나가 로봇의 설계 시 파워와 힘을 제한하도록 하는 것으로, 로봇 말단에서의 최대 정적 힘을 150 N 이하로 하는 것이다. 실제로 로봇의 구동 토크 중 상당 부분이 로봇의 자중을 지지하는 데 사용되고 있는데, 로봇의 자중을 기구적인 방법으로 보상할 수 있다면 로봇의 구동 파워를 현저히 낮출 수 있다.

본 논문은 자중 보상 기법, 특히 로봇의 설치면 자세 변화에 대응 가능한 자중 보상 기법을 적용하여 근원적인 안전성을 확보한 안전 매니플레이터를 제안하고, 로봇과의 협동 작업 시 발생 가능성이 높은 클램핑 상황에서의 충격력 측정을 통하여 설계한 로봇의 안전성을 검증하였다. 또한 로봇의 설치면 변화에도 로봇의 자중 보상이 적절히 이루어지고 있음을 제시하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 로봇의 설치면 자세 변화에 대응 가능한 자중 보상 기법에 대하여 기술하고, 3장에서는 클램핑 상황에서의 충격력 측정 및 분석 결과를 제시한다. 4장에서는 제안한 방법의 성능 검증을 위하여 개발한 프로토타입 로봇을 적용한 실험 결과를 제시한다. 끝으로 5장에서 결론을 맺는다.

2. 로봇 설치면 변화에 대응 가능한 자중 보상 기법

2.1 메커니즘

로봇의 자중으로 인하여 발생하는 중력 토크를 보상하기 위한 자중 보상 메커니즘은 기존 연구와 유사하게 스프링과 와이어로 구성되어 있다^[8]. 기본적인 동작 원리는 조인트의 회전에 따른 스프링의 복원력으로 인하여 와이어의 장력이 발생하고, 이 장력에 의하여 발생하는 보상 토크가 로봇의 자중에 의하여 발생하는 중력 토크와 정적 평형을 이루게 되는 것이다. Fig. 1(a)는 기본 동작 원리를, Fig. 1(b)는 조인트 각도에 따른 중력 토크와 보상 토크의 변화를 보여주고 있다. Fig. 2는 본 논문에서 제시하고 있는 자중

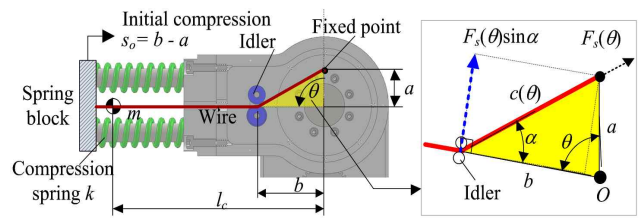


Fig. 2 Designed counterbalancing mechanism

보상 메커니즘을 제시하고 있다. Fig. 2에서 중력토크 T_g 와 보상토크 T_c 는 식 (1), 식 (2)와 같이 기술된다.

$$T_g = mgl_c \sin(\theta) \tag{1}$$

$$T_c = bF_s(\theta) \sin(\alpha) \tag{2}$$

여기서 $F_s(\theta) = k\{s_0 + c(\theta) - (b - a)\}$, $\sin(\alpha) = a \sin(\theta) / c(\theta)$. 스프링 상수 k 는 T_g 와 T_c 간의 평형이 이루어지도록 식 (3)과 같이 결정한다.

$$k = mgl_c / ab \tag{3}$$

로봇의 베이스 설치면이 고정되어 있는 경우는 Fig. 1(b)와 같이 중력토크가 보상토크에 의하여 상쇄되지만, 베이스 설치면의 각도가 변화하는 경우는 그에 따라서 중력 방향이 변하기 때문에 기계산된 보상토크가 중력토크를 완전히 상쇄시키지 못한다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 본 논문에서는 설치면의 각도를 측정할 수 있는 기울기 센서를 부착하여 이에 대응되는 보상토크를 생성할 수 있는 시스템을 제안하고 있다. 즉, 설치면의 각도가 변하더라도 항상 중력토크를 상쇄시킬 수 있는 보상토크가 생성된다. 설치면 각도에 따라 보상토크를 변화시키는 방법은, Fig. 2의 자중 보상 메커니즘 구조에서 와이어가 고정되는 중력 보상 기준면을 로봇의 베이스 설치면 각도에 대응하여 능동적으로 움직여 주는 것이다. 즉, 자중 보상 기준면을 늘 중력방향과 일치시켜 설치 기준면이 고정되어 있는 경우와 동일하게 중력토크를 상쇄하는 보상토크를 만들어 내도록 하는 것이다. Fig. 3은 로봇의 설치면이 변하는 경우를 보여주고 있는데, 설치면 각도의 변화로 인하여 고정되어 있는 중력 보상 기준면이 중력방향과 일치하지 않음을 확인할 수 있다. Fig. 4는 설치면 변화에 따라서 자중 보상 기준면이 능동적으로 변화하는 경우로 설치면의 각도에 따라서 중력 보상 기준면이 달라지는 것을 보여주고 있다.

제안한 방법의 경우 자중 보상 기준면을 설치면 각도 변화량만큼 회전시켜주기 위해서는 추가적인 액츄에이터가 필요한데, 이 때 중력토크에 해당하는 부하가 인가되기 때문에 해당 부하를 감당할 수 있는 액츄에이터가 요구된다. 하지만 베이스 설치면의 변화는

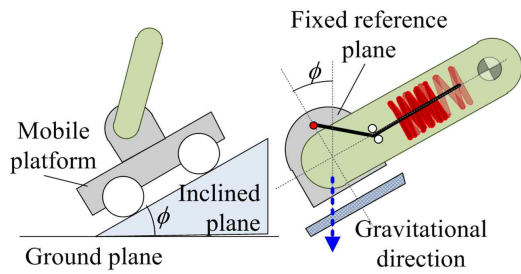


Fig. 3 Posture change of base plane

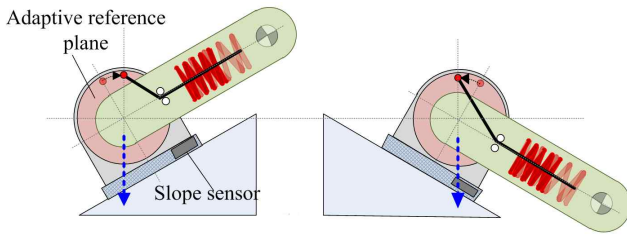


Fig. 4 Active control scheme of reference plane

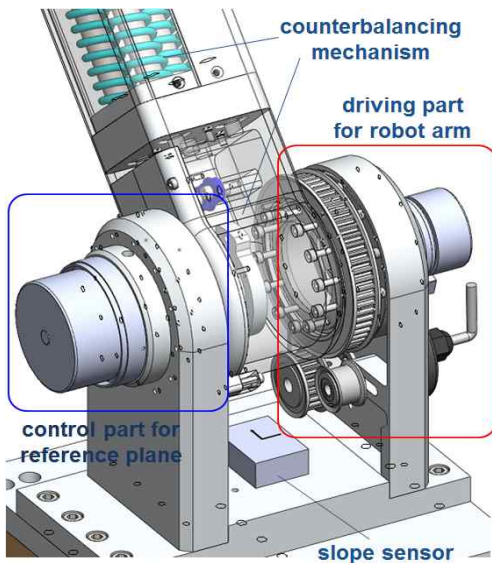


Fig. 5 One-degree-of-freedom manipulator with proposed counterbalancing mechanism

로봇의 설치 시에만 고려하면 되는 것으로 로봇의 구동 중 빈번하게 발생하는 경우가 없어 빠른 응답속도가 요구되지 않는다. 이동 로봇에 탑재되는 경우에도 이동로봇이 주행하는 지면의 경사각 변화가 급격하게 일어나지 않으므로 이 경우 또한 빠른 응답속도가 요구되지 않는다. Fig. 5는 제안한 메커니즘을 제시하고 있는데, 로봇 구동부와 자중 보상 기준면 제어부를 포함하고 있고, 설치 기준면 변화를 측정하기 위한 기울기 센서가 부착되어 있다.

2.2 성능 검증

제안한 방법의 타당성을 검증하기 위하여 로봇의 설치면 변화에

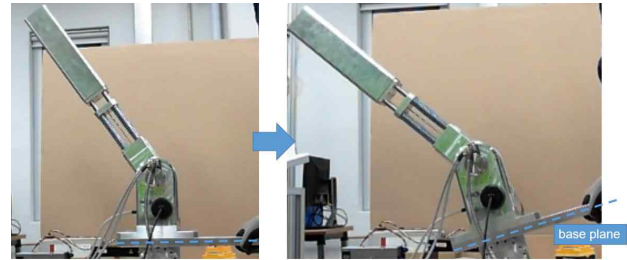


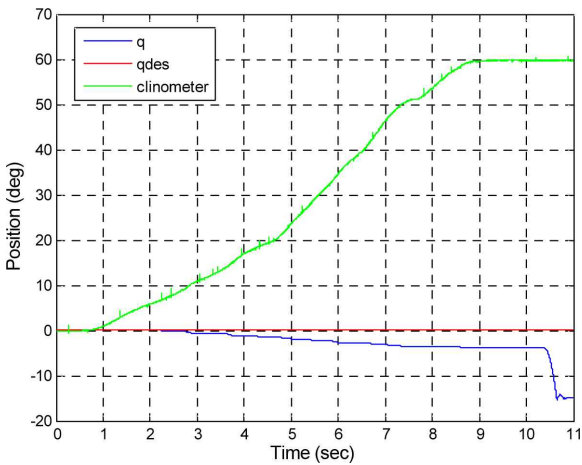
Fig. 6 Angle change of base plane

따라 자중 보상 기준면의 변화가 가능한 경우와 자중 보상 기준면이 고정된 경우에 대한 비교 실험을 진행하였다. Fig. 6과 같이 설치면을 변화시켜가면서 기존 방법과 제안한 방법 각각의 변화를 확인하였다. 위치 명령은 현재 위치를 유지하도록 하여 자중 보상이 정확하게 이루어질 경우 추가적인 구동토크를 인가할 필요가 없도록 하였다.

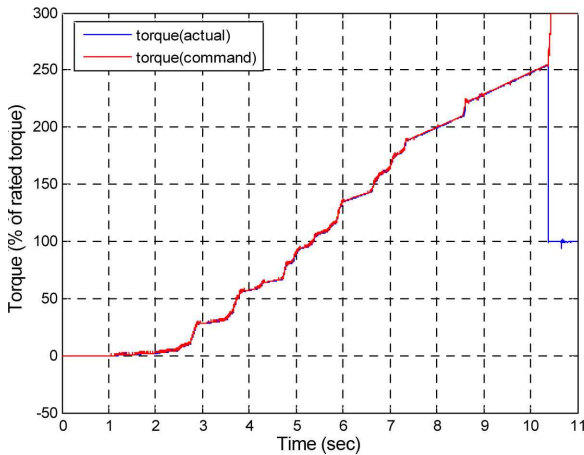
첫 번째 실험은 자중 보상 기준면이 고정된 경우에 대하여 진행하였다. 베이스 설치면의 각도가 변화함에 따라서 자중 보상이 정확하게 이루어지지 않아서 조인트 위치가 변하게 되고, 주어진 위치명령(조인트의 초기 위치)을 추종하기 위하여 토크가 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 즉, 자중 보상이 정확하게 이루어지지 않아서 자중 지지를 위한 추가적인 보상토크가 요구되고 이것이 로봇의 구동부 부하로 작용하는 것이다. Fig. 7(a)의 그래프에서 기울기 센서가 증가함에 따라서 조인트 위치 q 가 변하는 것을 볼 수 있고, Fig. 7(b)의 토크 데이터에서 토크입력이 증가하다가 정격을 초과하여 포화되는 것을 확인할 수 있다. Fig. 7(a)에서 10.5초 이후 조인트 위치가 급격하게 변하는 부분이 구동기의 토크입력이 포화되는 시점이다. 두 번째로 자중 보상 기준면의 능동적 제어가 이루어지는 경우에 대하여 동일한 실험을 수행하였다. 이 경우는 로봇의 베이스 설치면 각도 변화와 무관하게 항상 자중 보상이 정확하게 이루어지므로 조인트 위치 변화가 발생하지 않았고, 따라서 위치명령 추종을 위한 토크가 인가되지 않았다. Fig. 8에 기울기 센서 값 변화와 조인트 위치 및 토크 궤적 데이터를 제시하고 있다. 이상의 비교 실험에서 로봇 설치면의 기울기가 변화할 경우 제안한 방법의 유효성을 검증할 수 있었다. 자중 보상 기준면이 설치면 각도에 대응하여 변화하게 되면 로봇의 자중 보상 효과 및 로봇의 제어 성능은 설치면이 수평인 경우와 동일하므로 설치면이 고정되어 있는 경우를 가정하여 이후 내용을 기술하겠다.

3. 인간과 로봇의 충돌 시 클램핑 힘 분석

인간과 로봇의 충돌 시 안전 확보를 위한 제안한 자중 보상 메커니즘을 탑재한 로봇 매니퓰레이터의 유효함을 분석하기 위하여 충

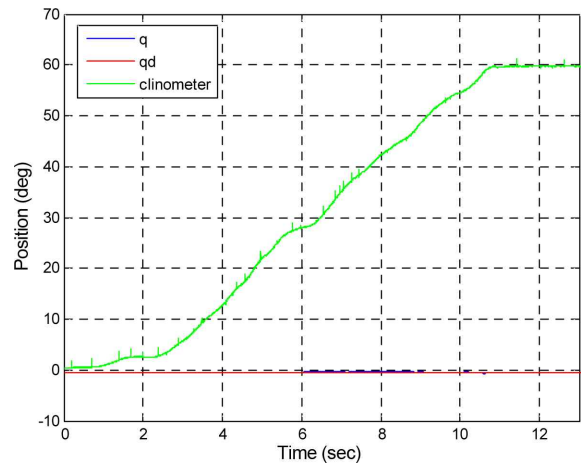


(a) Position trajectory

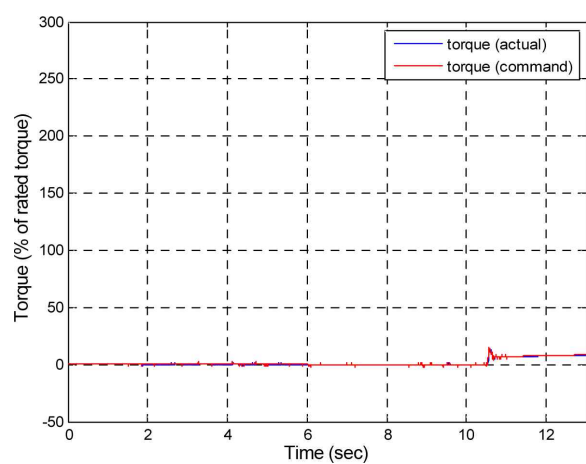


(b) Torque trajectory

Fig. 7 Validation results without the active compensating scheme for posture change of base plane



(a) Position trajectory



(b) Torque trajectory

Fig. 8 Validation results with the active compensating scheme for posture change of base plane

돌 시 발생하는 클램핑 힘에 대한 분석을 수행하였다. 클램핑은 인간의 신체 일부가 로봇의 말단 또는 말단에 부착된 틀에 의하여 눌리는 경우로 인간과 로봇의 협동 작업 시 발생 가능성이 높은 경우이다. 이러한 클램핑 상황에서 인간의 상해를 줄이기 위해서는 로봇이 누르는 정적 힘을 감소시키는 것이 중요하다. 이를 위하여 ISO 10218 표준에서도 최대 정적 힘을 150 N 이하로 하도록 규정하고 있다.

제안한 매니플레이터의 클램핑 상황에서의 정적 힘을 측정하기 위하여 Fig. 9와 같은 실험 장치를 구성하였다. 우선 로봇 매니플레이터가 누르는 힘을 측정하기 위하여 지면에 수직 방향으로 힘 센서를 부착하였는데, 힘 센서는 ATI사의 Mini58 모델^[9]을 사용하였다. 또한 로봇 매니플레이터의 말단에는 충격력을 센서로 전달하기 위한 임팩터를 부착하였는데 반발계수가 1에 가까운 당구공을 사용하였다.

제안한 메커니즘의 유효성을 확인하기 위하여 비교 실험을 수행하였다. 동일한 매니플레이터에 제안한 자중 보상 메커니즘이 적용

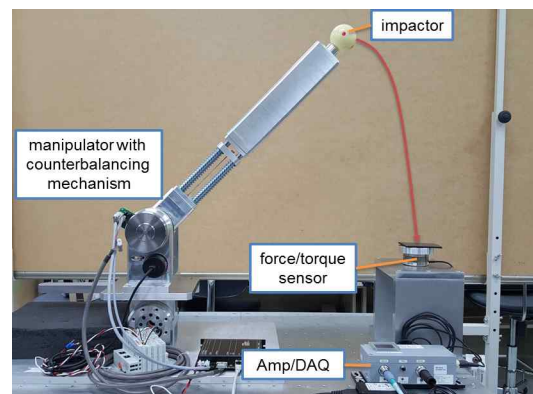


Fig. 9 Equipment used to measure the clamping force

된 경우와 적용되지 않은 경우의 정적 충격력을 비교하였다. 제안한 방법을 적용한 경우는 클램핑 힘이 27 N, 적용하지 않은 경우는 클램핑 힘이 107 N으로 측정되었다. 즉, 제안한 방법을 적용한 경우 클램핑 상황에서의 정적 충격력이 현저하게 감소됨을 확인할 수 있었다. Fig. 10은 측정 결과를 보여주고 있다. 이 실험에서는

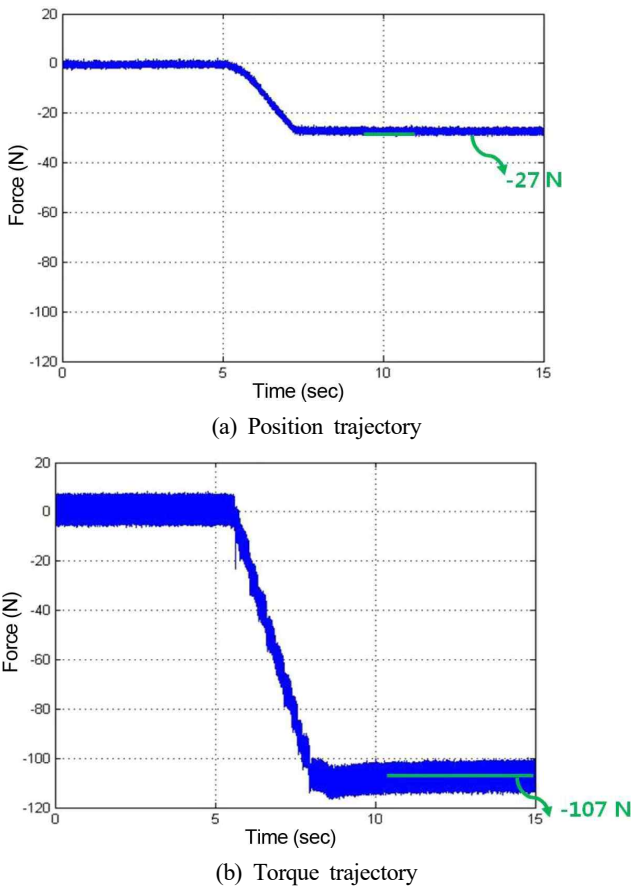


Fig. 10 Measurement results for the clamping force

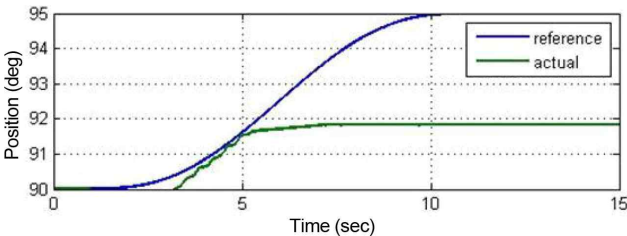
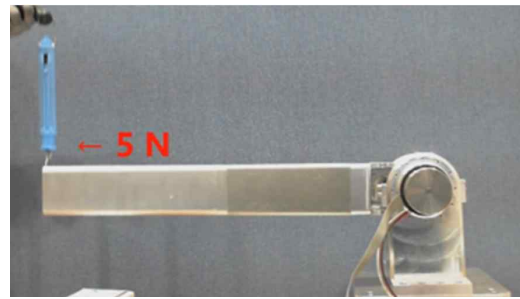


Fig. 11 Desired and actual position trajectory in measuring clamping force

부하를 고려하지 않고 있는데, 가반질량 5 kg을 고려할 경우 부하 무게에 의한 정하중 증가분 약 50 N, 그리고 부하를 핸들링하기 위한 모터 토크 용량 증가분에 따른 정하중 증가분 약 70 N을 고려할 경우, 상기 측정치에서 약 120 N이 증가하게 되고, 이를 고려하더라도 총 클램핑 힘은 150 N 이하임을 확인할 수 있다.

충돌 시 동적 임팩트의 효과를 배제하고 클램핑 상황에서의 최대 정적 충격력을 측정하기 위하여 힘 센서를 로봇 말단의 움직임 경로 중간에 위치시켜 힘 센서를 최대 토크로 누르도록 실험을 설정하였다. 구체적으로 조인트 위치가 90도에서 95도까지 움직이도록 하고, 힘 센서와 92도 정도의 위치에서 충돌하도록 하였다. 즉, 힘 센서가 물리적으로 매니플레이터의 움직임을 막고 있으므로 최대



(a) With the counterbalancing mechanism



(b) Without the counterbalancing mechanism

Fig. 12 Comparison of forces needed to raise the manipulator

힘으로 센서를 누르게 된다. Fig. 11은 이때의 위치 명령 궤적과 실제 위치 궤적을 보여주고 있다. 실제 위치가 92도 부근에서 멈춰 있는 것을 확인할 수 있다.

4. 실험

본 논문에서 제안한 자중 보상 메커니즘 기반 매니플레이터의 성능을 검증하기 위하여 Fig. 5에서 제시한 1자유도 자중 보상 매니플레이터를 구현하였다. 로봇팔의 질량은 5.8 kg, 길이는 565 mm이고, 자중 보상을 위하여 선정된 스프링의 스프링 상수는 $k = 11.1$ N/mm이다. 우선 자중 보상 효과를 비교하기 위하여 자중 보상 메커니즘이 적용되어 보상토크가 인가되는 경우와 미적용된 경우, 로봇 팔을 들어 올리는데 필요한 힘을 용수철 저울을 사용하여 측정하였다. 자중 보상 메커니즘이 적용된 경우는 초기 마찰력을 극복하기 위한 힘만 필요하므로 5 N의 힘만으로 들어 올릴 수 있었지만, 자중 보상 메커니즘이 적용되지 않은 경우에는 32 N의 힘이 필요하였다. Fig. 12는 실험장면을 보여주고 있다.

다음으로 구동 토크 측면에서 제안한 자중 보상 메커니즘의 유효성을 입증하기 위한 비교 실험을 진행하였다. 제어 알고리즘은 기본적인 피드백 제어기 외에 추가로 스프링 요소 등으로 인한 진동 요소를 막기 위한 피드포워드 제어 알고리즘을 동시에 사용하였다. 추중해야 할 기준궤적으로는 식 (4)의 사인 궤적을 사용하였다.

$$q^d(t) = 60 \sin(\pi t) [\text{deg}] \quad (4)$$

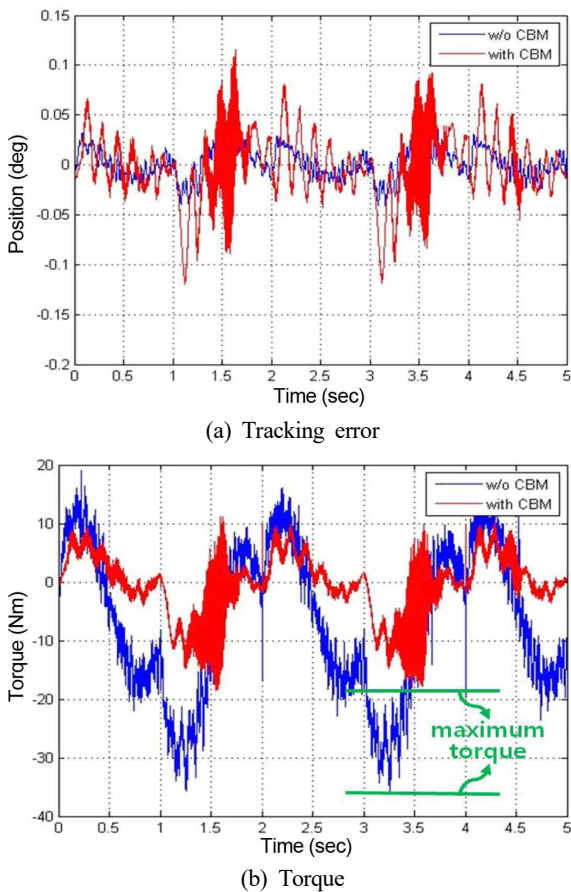


Fig. 13 Performance comparison with and without the proposed counterbalancing mechanism

Fig. 13(a)는 두 가지 경우에 대한 기준궤적에 대한 추종 결과를 보여주고 있다. 자중 보상 메커니즘이 적용된 경우 스프링 요소로 인한 진동 특성이 보이는 것 외에는 두 경우에 있어 추종오차의 정도는 유사하였다. 하지만 Fig. 13(b)에서 보듯이 구동토크의 최대치는 현저한 차이를 나타낸다. 이는 자중 보상 메커니즘을 적용할 경우 보상토크가 메커니즘에 의하여 생성되므로 모터의 구동토크가 낮아지기 때문이다. 이상의 실험 결과에서 제안한 자중 보상 메커니즘의 유효성을 입증할 수 있었다.

5. 결론

본 논문은 자중 보상 메커니즘을 로봇 매니퓰레이터에 도입함으로써 자중 보상에 필요한 토크치에 해당하는 구동부 파워를 감소시킴으로써 인간 로봇 공존 환경에서 주변 작업자의 안전을 확보할 수 있는 안전 매니퓰레이터를 제안하였다. 그리고 로봇의 설치면

자세가 변화할 때 자중 보상토크가 중력토크를 정확히 상쇄시키지 못하는 문제를 해결하기 위하여 설치면에 따른 중력 보상 기준면을 제어하는 방법을 제안하고 검증하였다. 로봇의 안전성을 검증하기 위하여 클램핑 상황에서의 정적 충격력을 측정하여 기존 대비 상해 위험성을 감소시킬 수 있음을 확인하였다. 향후 본 논문에서 제안한 1자유도 매니퓰레이터에 대한 자중 보상 메커니즘을 다자유도로 확장하고, 확장된 메커니즘에서도 클램핑 힘 측면에서 안전성의 유효함을 확인하고자 한다.

References

- [1] Bogdan, S., Lewis, F.L., Kovacic, Z., Gurel, A., 2002, An implementation of the Matrix-based Supervisory Controller of Flexible Manufacturing Systems, *IEEE Tran. Control System Technology*, 10:5 709-716.
- [2] Moore, K.W., Newman, R., Chan, G., Leech, C., Allison, K., Coulson, J., Simpson, P.B., 2007, Implementation of a High Specification Dual-arm Robotic Platform to Meet Flexible Screening Needs, *Journal of the Association for Laboratory Automation*, 12:2 115-123.
- [3] Do, H. M., Choi, T.-Y., Kyung, J. H., 2016, Automation of Cell Production System for Cellular Phones using Dual-arm Robots, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 83 1349-1360.
- [4] Park, C. H., Kyung, J. H., Park, D. I., Gweon, D.-G., 2010, Direct Teaching Algorithm for a Manipulator in a Constraint Condition using the Teaching Force Shaping Method, *Advanced Robotics*, 24 1365-1384.
- [5] Universal Robots, viewed 10 Oct. 2016, <<https://www.universal-robots.com/>>.
- [6] Park, J.-J., Song, J.-B., 2010, A Nonlinear Stiffness Safe Joint Mechanism Design for Human Robot Interaction, *ASME Journal of Mechanical Design* 132:6 0610051-0610058.
- [7] ISO 10218-1:2006, viewed 10 Oct. 2016, <https://http://www.iso.org/iso/catalogue_detail.htm?csnumber=36322/>.
- [8] Kim, H.-S., Song, J.-B., 2014, Multi-dof Counterbalance Mechanism for a Service Robot Arm, *IEEE/ASME Transactions of Mechatronics*, 19:6 1756-1763.
- [9] ATI F/T Sensor: Mini58, viewed 10 Oct. 2016, <http://www.atia.com/products/ft/ft_models.aspx?id=Mini58>.