

중력보상장치 설계계수를 고려한 고가반 로봇설계에 관한 연구

이도승*, 이호수**, 표상훈**, 윤정원**.#, 류성기*.#

*경상대학교 기계항공공학부, **광주과학기술원 융학기술학제학부

Study on Design of Heavy Payload Robot Considering Design Factor of Gravity Compensator

Do-Seung Lee*, Ho-Su Lee**, Sang-Hun Pyo**, Jung-Won Yoon**.#, Sung-Ki Lyu*.#

*Department of Mechanical & Aerospace Engineering, ReCAPT, Gyeongsang National University

**Institute of Integrated Technology, Gwangju Institute of Science and Technology

(Received 21 February 2019; received in revised form 1 March 2019; accepted 10 March 2019)

ABSTRACT

In recent years, medium- to large-scale transportation machinery and machine tool manufacturing process lines have shown a trend toward centralization, softening, lightening, and slimming to reduce costs and increase productivity. This has increased the demand for vertical articulated robots. When developing and introducing a heavy weight-handling robot that can be easily applied to existing production lines, it is expected to have a great effect in securing industrial competitiveness by solving industrial issues such as the decreased productivity and increased risk of accidents due to work involving heavy lifting. In this study, we design a 6-axis robot mechanism with a heavy load-handling capacity of 700kg or more for large-sized materials of various types supplied in small quantities.

Key Words : Heavy Payload(고가반하중), Industrial Robot(산업용로봇), Gravity Balance(중력보상)

1. 서 론

최근 자동차 제조공정라인과 같이 중대형 수송 기계 및 공작기계 제조 공정라인도 투자비 절감 및 생산성 향상을 위해 공정라인 자동화가 요구된다. 이와 같은 산업용 로봇에 관한 연구들을 많이 수행되고 있다^[1,2].

기존 고가반 하중의 수직다관절 로봇의 경우 상용 6축 다관절 로봇과는 다른 구조를 갖는다. 그 이유는 직렬 로봇의 각 관절에 구동모터가 위치하기 때문에 구동부의 핵심 부품인 감속기와 서보 모터의 용량 한계가 있기 때문이다. 가반하중이 같은 모델을 비교하기 위해 가반하중 700 kg 급의 모델로 조사하였다. 기존 고중량물 핸들링 로봇의 경우 작업물 가반 시 반대방향으로 힘을 보상해주는 중력 보상 장치가 각 메이커 별로 특징적인 방식으로 되어있으며, 최근 중력보상장치에 관한 연구들을 많이 수행하고 있다^[3-8]. Table 1에 도시한 것과 같

Corresponding Author : sklyu@gnu.ac.kr,

Tel: +82-55-772-1632, Fax: +82-55-772-1578

jyoon@gist.ac.kr, Tel: +82-62-715-5332, Fax: +82-62-715-5309

이 스위스 ABB기업의 IRB 8700/3.5와 일본 Fanuc 주식회사의 M900iB/700는 Fig. 1과 같이 Counter weight와 Spring system 2가지 중력보상장치를 이용하지만 로봇 손목부의 구동모터가 가반하중에 영향을 주고 Reach가 짧다. 독일 KUKA 회사의 KR1000 L750 titan PA는 Reach가 길고 높은 가반하중을 가지지만 모터용량이 크고, 로봇의 무게가 크다.

따라서 본 연구에서는 기존 로봇의 단점을 보완하고 가반하중 700 kg 이상 급의 고중량물 핸들링 6축 로봇 기구를 설계하고자 한다.

2. 이론

본 연구에서 제안된 6축 다관절 로봇은 Fig. 2에 도시하였다. 구동모터가 가반하중에 영향을 주지 않도록 Link 3 후단 로봇 손목부 구동축에 3개의 서보모터를 배치하였다. Link2에 스프링 방식의 중력보상장치를 적용하고, Link 3에 4bar linkage의 Counter weight를 적용하여 모터용량을 감소시켰다.

시스템을 설계하는 과정에서 기구해석 및 동적해석을 수행하였으며 이를 통해 고가반 6축 로봇의

Table 1 Comparison of existing robots

	Gravity balance system	Wrist motor position
ABB, Swiss	- Counter weight - Spring system	5-axis
Fanuc, Japan	- Counter weight - Spring system	3-axis
KUKA, Germany	- Spring system	3-axis

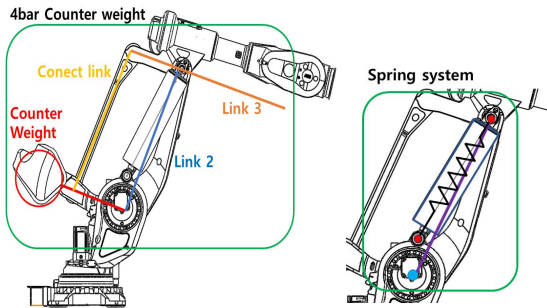


Fig. 1 Gravity compensation device

기구적 모델 및 동역학적 모델을 제시하고, 동역학 해석을 통해 중력보상장치의 특징 및 최적 계수를 도출하고, 각 링크의 최적 모터용량 설계를 하였다.

2.1 로봇기구학 해석

기구학 해석을 위해 정의한 좌표계 및 DH 파라미터는 각각 Fig. 3, Table 2에 도시하였다. 정의한 좌표계를 통해 각 링크 좌표계에서 다음 링크의 좌표계까지의 상대적인 위치 및 자세를 나타내는 DH 파라미터 값으로 기본변환행렬을 이용하여 로봇의 Base로부터 끝단까지의 전체 변환행렬을 구할 수 있다. 이 때 T는 변환 행렬이다.

$${}^0T = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & P_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & P_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & P_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

r_{ii} 는 로봇의 Base에 대한 끝단의 회전변환행렬 요소를 나타내며, P_i 는 로봇의 Base에 대한 끝단의 위치를 나타낸다. 로봇 끝단의 위치 및 자세에 대한 기구학식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\dot{P} = J\dot{\theta} = \begin{bmatrix} J_p \\ J_o \end{bmatrix} \quad (2)$$

여기서 $\dot{\theta}$ 은 로봇의 각 관절의 각속도, J는 자코비안(jacobian)행렬이고, J_p 는 Position Jacobian, J_o 는 Orientation Jacobian이다.

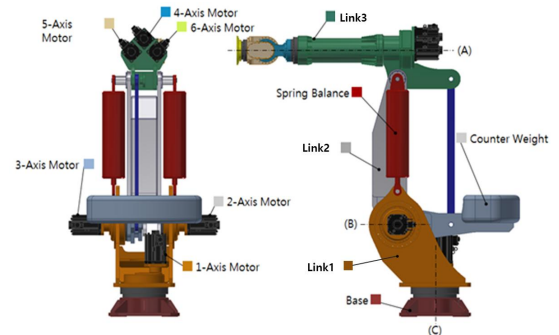


Fig. 2 Designed articulated robot

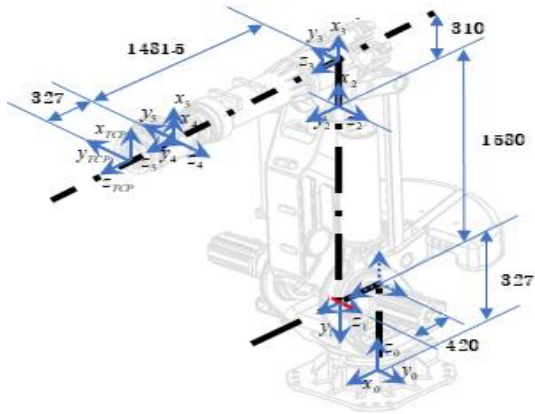


Fig. 3 Robot coordinate system

Table 2 DH parameter

i	$a_i(mm)$	$\alpha_i(deg)$	$d_i(mm)$	$\theta_i(deg)$
1	420	-90	1036	θ_1
2	1580	0	0	$\theta_2 - 90$
3	310	-90	0	θ_3
4	0	90	1481.5	θ_4
5	0	-90	0	θ_5
6	0	0	327	θ_6

2.2 로봇동역학 해석 조건

6축 고가반 로봇의 동역학 해석을 통해 로봇 각 조인트에 걸리는 토크 및 모터 용량을 획득하기 위해 기구학 시뮬레이터를 이용하여 Fig. 4과 같이 y-z 및 z-x 평면에서 총 4가지의 원형의 desired trajectory를 생성하였다. Case 1과 Case 2는 시작점 (2000, 0, 3000)을 두고 각각 y-z평면과 x-z평면의 원형 궤적 운동을 하고, Case 3과 Case 4는 로봇의 끝단이 워크 스페이스 경계선에 근접하도록 시작점 (3000, 0, 1250)을 두고 각각 y-z평면과 x-z평면의 원형 궤적 운동을 하도록 생성하였다. ADAMS 시뮬레이션을 이용하여 가반 질량조건 700kg, 로봇의 끝단 이동 속도 1.2 m/s 설정하고 생성된 원형 궤적에 따라 동역학 해석을 하였다.

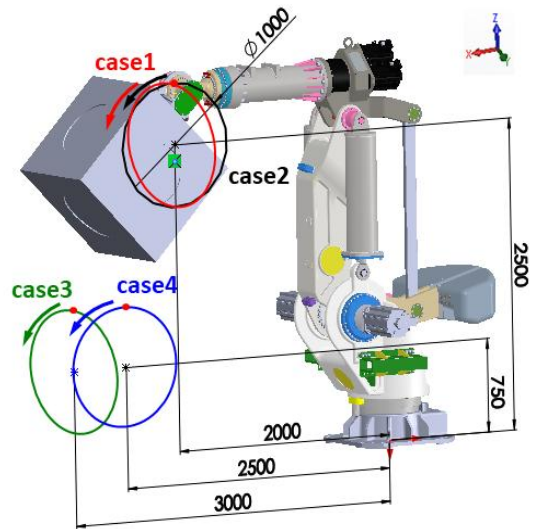


Fig. 4 y-z and z-x plane circular desired trajectory

3. 실험결과 및 고찰

3.1 중력보상장치 동역학 해석

Link 2에 설계된 스프링 방식의 중력보상장치가 로봇에 주는 영향을 알아보기 위해 스프링 계수를 달리하여 동역학 해석을 수행하였고, 스프링 방식의 중력보상장치가 Joint 2의 토크에 영향을 미치는 것을 확인하였다. Fig. 5에 도시된 그래프와 같이 Case 3에서는 스프링 계수가 425 N/mm일 때 토크 값이 최저이고, Case 4에서는 스프링 계수가 1000 N/mm일 때 토크 값이 최저임을 확인할 수 있다. ADAMS에서 해석된 토크-각속도 그래프를 분석하여 Table 3에 도시된 것과 같이 Case 1~4에서 토크 및 모터용량의 최댓값을 산출하여 설계된 최대 모터용량과 비교하였다.

스프링 계수의 최적 값을 찾기 위해 Joint 2에 최대 토크가 발생하는 Case 3과 Case 4의 원형 궤적운동에서 스프링 계수 425 ~ 1000 N/mm 사이의 값으로 추가 해석을 하였고, Table 4에 도시된 것과 같이 스프링 계수 570 N/mm 이하 값에서 안전 계수가 3 이상을 가지고 있음을 확인할 수 있었고, 스프링 방식 중력보상장치의 최적 계수를 선정에 고려하였다.

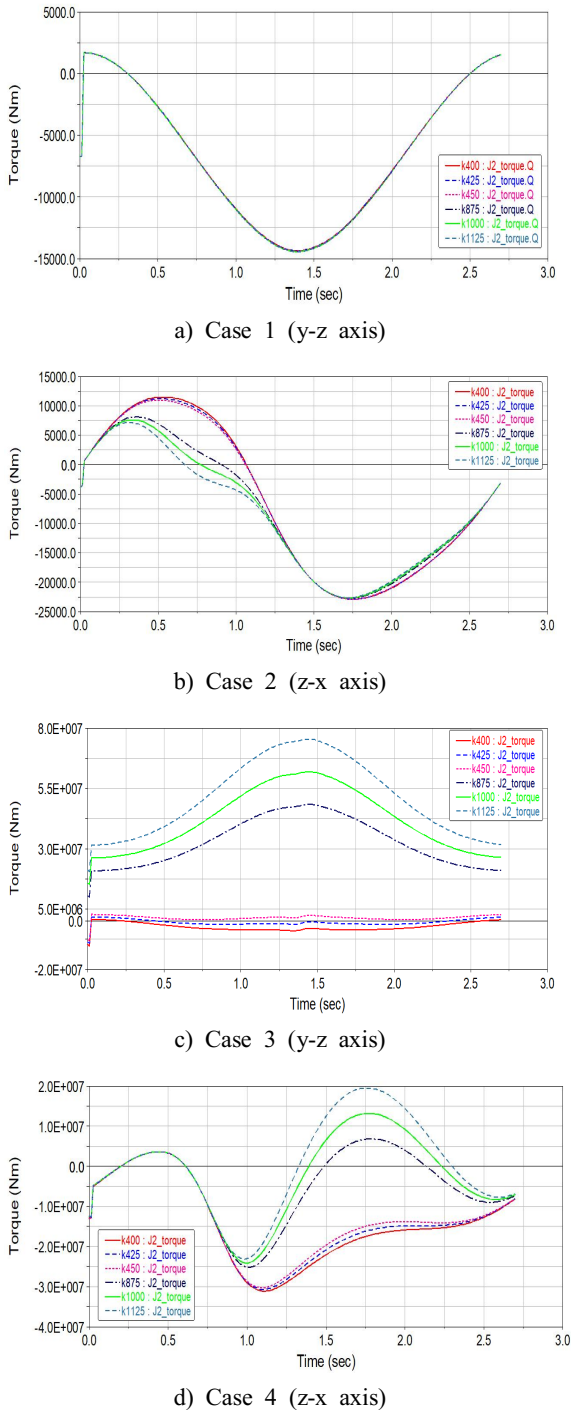


Fig. 5 Joint 2 torque by spring coefficient

Table 3 Maximum torque

	Analyzed data (Nm)	RAON 700 (Nm)	Safety factor
J1	10,992 (Case3)	53,305	4.8
J2	28,510 (Case4)	45,588	1.6
J3	20,061 (Case4)	45,588	2.3
J4	2,032 (Case1)	21,023	10.3
J5	6,238 (Case4)	21,231	3.4
J6	12 (Case4)	20,906	-

Counter weight 중력보상장치의 구조는 4 bar linkage로 이루어져 있으며 Counter weight의 모터가 구동함에 따라 Link 3을 구동시킨다. Counter weight 중력보상장치가 로봇에 주는 영향을 알아보기 위해 Counter weight의 무게를 0 kg에서 2000 kg 사이의 값으로 동역학 해석을 수행하였고, Fig. 6에 도시된 그래프와 같이 Counter weight가 없을 때 로봇 베이스의 x축 모멘트가 2배 증가하는 것으로 보아 로봇이 고중량물을 가반 시 로봇 전체의 밸런스가 유지시켜주는 것으로 보이고, Fig. 7에 도시된 그래프와 같이 Counter weight는 Joint 2에 크게 영향을 주는 것을 확인할 수 있다. Counter weight의 무게가 증가할수록 Joint 2의 토크 그래프가 위로 offset 된 것으로 보아 중력 반대 방향으로 로봇이 움직일 때 중력 보상을 하는 것을 알 수 있고, 로봇의 끝단이 로봇 중심으로 멀어질수록 Counter weight의 역할이 중요하다고 판단된다. Case 4의 토크 그래프에서 Counter weight의 무게가 증가하지만 offset 되지 않는 구간이 있다. 이 구간에서는 중력보상이 일어나지 않고 오히려 토크가 커진다. 앞서 동적 해석한 결과로 실제 선정된 스프링 방식 중력보상장치의 스프링 계수 k값 95 N/mm에 Preload 4,750 N, Counter weight 중력보상장치 무게 1,287 kg 를 설정하여 동역학 해석을 하였고, 선정된 모터 스펙 안에 해당하는 것을 확인할 수 있다.

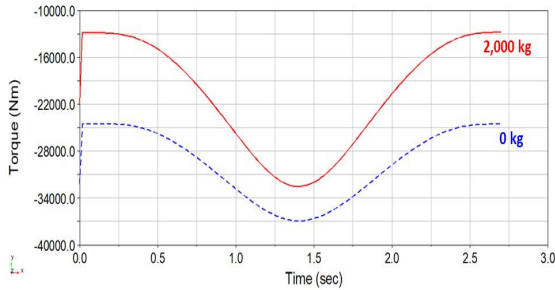
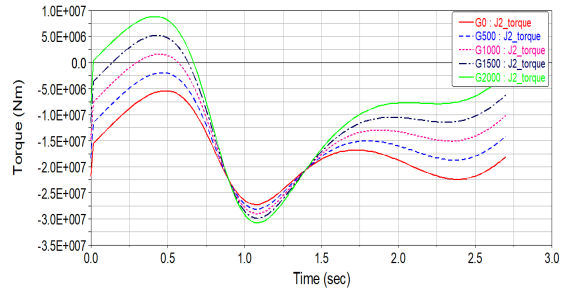
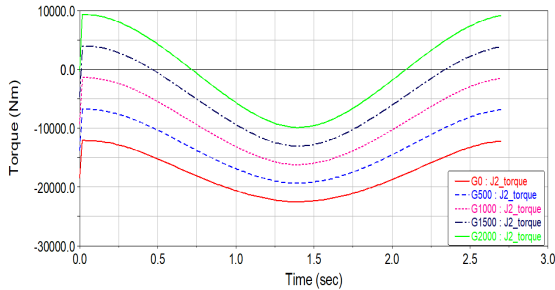


Fig. 6 Joint 1 x-axis moment with or without counter weight

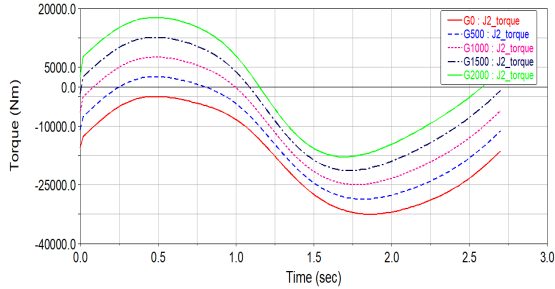


d) Case 4 (z-x axis)

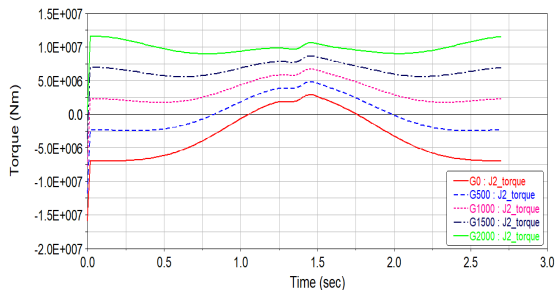
Fig. 7 Joint 2 torque according to counter weight mass



a) Case 1 (y-z axis)



b) Case 2 (z-x axis)



c) Case 3 (y-z axis)

Table 4 Maximum motor capacity

	Analyzed data(kW)	RAON 700(kW)	Safety factor
J1	2.3 (Case3)	35	15.2
J2	33.3 (Case4)	35	1.1
J3	14.3 (Case4)	35	2.4
J4	1.1 (Case1)	27	24.5
J5	6.1 (Case4)	27	4.4
J6	0.1 (Case1)	27	-

4. 결론

본 논문에서는 고가반 수직다관절 로봇의 중력보상장치 분석 및 설계 계수 최적화를 통한 설계를 하였다. ADAMS 동역학 시뮬레이션 프로그램을 이용하여 각 Joint에 걸리는 토크 및 모터 용량을 분석함으로써 다음과 같은 결과를 얻었다.

1. 기구학 및 동역학 해석을 통해 고가반 수직다관절 로봇의 스펙을 선정하였다.
2. 설계된 고가반 로봇의 특징인 중력보상장치 중 스프링 방식은 2축 토크의 감소를 기대할 수 있

고, Counter weight 방식은 2, 3축의 토크 감소와 로봇 전체 베이스의 모멘트 감소를 기대할 수 있다.

3. 기존 4 bar Counter weight 방식은 무게 중심이 Joint 2에 수직 이상일 때, 중력보상상실이 일어남을 확인하였고, 이를 해결 시 로봇의 모터용량 감소를 기대할 수 있다.

후 기

본 연구는 산업통상자원부와 한국산업기술진흥원의 “지역산업거점기관지원사업”(과제번호 R0006505)으로 수행된 연구결과입니다.

REFERENCES

1. Cocota, J. A. N., Fujita, H. S. and da Silva, I. J., "A low-cost robot manipulator for education," Technologies Applied to Electronics Teaching (TAEE), Vigo, 2012, pp. 164-169, 2012.
2. Chung, S. Y. and Choi, D. S., "Kinematic and Structural Analysis of a 6-DOF Manipulator for Narrow-space Work," Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society, Vol. 18, No. 3, pp. 666-672, 2017.
3. Kim, H. S. and Song, J. B., "Low-Cost Robot Arm with 3-DOF Counterbalance Mechanism," IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation 2013, pp. 4168-4173, 2013.
4. Lacasse, M. A., Leneviève, G., Boisclair, J., Ouellet, J. and Gosselin, C., "On the Design of a Statically Balanced Serial Robot Using Remote Counterweights," IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp. 4174-4179, 2013.
5. Park, J. G., Lee, J. Y., Kim, S. H., and Kim, S. R., "Optimal Design of Passive Gravity Compensation System for Articulated Robots," Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers - A, Vol. 36, No. 1, pp. 103-108, 2012.
6. Kang, I. H., Kim, H. S., Song, J. B., Lee, H. S. and Chang, I. S., "Manipulator Equipped with Counterbalance Mechanism Based on Gear Unit," Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers - A, Vol. 38, No. 3, pp. 289-294, 2014.
7. Choi, H. S., Kim, Y. S., and Baek, C. Y., "A Revolute Robot Manipulator with a New Structure," Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers - A, Vol. 28, No. 5, pp. 539-546, 2004.
8. Shin, E. S., Lee, Y. H., A Passive Gravity-Compensation System for Articulated Robots, Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers - A, Vol. 24, No. 2, pp. 481-488, 2000.