한국마린엔지니어링학회지 제34권 제2호, pp. 318~324, 2010. 3 (ISSN 1226-9549)
Journal of the Korean Society of Marine Engineering

고가반 하중 이송가능한 경량 로봇 매니퓰레이터의 구조해석 연구

최형식† · 조종래[1] · 허재관[2] · 전지광[2]

(원고접수일 : 2010년 2월 8일, 원고수정일 : 2010년 3월 8일, 심사완료일 : 2010년 3월 18일)

Structure Analysis of the Light Robot Manipulator Capable of Handling Heavy Payloads

Hyeung-Sik Choi† · Jong-Rae Cho[1] · Jae-Gwan Hur[2] · Chi-Kwang Chun[2]

요 약 : 본 논문에서는 새로운 구조의 6축 다관절 로봇 매니퓰레이터의 경량화와 토크성능을 높이기 위하여 어깨관절부위에 중력보상기를 설계하고 적용하였다. 또한, 매니퓰레이터의 기구학 및 역기구학 해석을 하였다. 자체 중량 30Kg의 경량이면서도 25Kg 고가반하중 인 우수한 성능을 구비할 수 있도록 매니퓰레이터의 링크 구조에 대한 FEM 해석을 수행하였다. FEM 해석을 통하여 로봇 매니퓰레이터의 굽힘이나 파단에 대한 안정성을 확인하였다.
주제어 : 로봇 매니퓰레이터, 구조 해석, 경량로봇, 고가반하중 (高加飯荷重)

Abstract: In this paper, the structure of the gravity compensator has been designed and applied to a light structure of a new 6-axis robot manipulator to enhance its torque performance. Also, analyses on the kinematics and inverse-kinematics of the manipulator have been performed. An FEM analysis has been performed on the structure of robot links to have an excellent performance of delivering 25 kg payload despite of 30kg weight, which is very light compared with other manipulators. Through the FEM analysis, the stability on the vending or fracture of the links of the robot manipulator has been verified.
Key words: Robot manipulator, Structure analysis, Light robot, heavy loads

1. 서 론

산업용 로봇의 기구부적인 형태는 크게 저 부하, 단순 반복 작업인 조립작업에 적합한 스칼라 로봇 및 직교 로봇과 제품의 형상이 복잡하고 작업반경이 커질 경우 사용되는 다 관절 로봇으로 나눌 수 있다[1]. 이들 스칼라 및 다 관절 로봇의 구조적 공통점은 직렬로 연결된 연쇄적인 링크 구조이다[2-3]. 연쇄적인 구조의 단점은 상단 링크의 중량이 하단 링크의 관절에 거리에 비례하여 부과되는 것으로 특히, 다관절 로봇은 중력에 영향을 받아 스칼라 로봇에 비해 훨씬 큰 토크부하가 로봇의 관절 구동기에가해진다. 따라서 모터와 감속기의 용량이 커야 하고 이에 따라서 로봇의 부피와 중량이 커질 수밖에 없다. 로봇의 구조에서 상단 관절 링크에 부착된 모터와 감속기는 하부 관절 링크를 구동하는 모터의 부하가 되는 구조로 상단 관절 구동 모터의 용량이 커질수록 하단 관절의 부하가 증가하는 구조적인 단점을 갖는다[4]. 모터는 토크 증가를 위해 하모닉 드라이버나 RV 감속기와 같은 고 기어비를 갖는 감속기를 적용하고 있으나 이들

† 교신저자(한국해양대학교 기계공학과 교수, E-mail : hschoi@hhu.ac.kr TEL:(051)410-4969)
1 한국해양대학교 기계공학과 교수
2 한국해양대학교 기계공학과 대학원

의 일정 비율 이상의 토크 성능 증가는 불가능하다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 강성을 매우 높이는 병렬구조로 Stewart Platform이 제안되었고[5], 이를 로봇에 적용한 연구가 Minsky[6], Hunt[7], Mohamed[8] 등에 의해 수행되었다. 병렬형 로봇은 강성은 매우 높으나 기구 메커니즘의 해석이 매우 복잡하고 작업 반경이 작은 것이 실제 시스템에의 적용을 어렵게 하는 주된 요인이다.

또한 스프링 구조를 이용한 구조로 Ulrich, N.의 케이블 풀리 구조를 적용한 중력 보상 장치에 관한 연구가 수행되었다[9]. 케이블 풀리 구조는 높은 보상력을 얻을 수 있지만 다양한 관절 링크에 적용하기에는 형태가 복잡해지고, 조립에 있어서도 유연성이 떨어지는 단점이 있었다. 그리고 Fattah, A.에 의해 질량 중심에 스프링 구조를 적용한 매니퓰레이터의 중력 밸런싱 기법에 관한 연구[10]를 수행한 결과가 있었다. 기존의 매니퓰레이터의 토크 저감 장치의 단점을 보완하기 위한 새로운 형태의 구조로써 구동부에 직접 부착이 가능하고, 기구부의 해석이 간단하도록 스프링 구조를 적용한 중력 보상기의 적용에 관한 연구가 있었다[11].

본 논문에서는 6축의 매니퓰레이터 구조를 갖는 다 관절 로봇의 부하토크 감쇠를 위한 최적화 된 중력 보상기의 구조를 설계하고, 경량이면서도 높은 가반 하중을 적용할 수 있도록 매니퓰레이터에 가해지는 부하 및 가반하중의 영향에 대한 역학조사와 FEM 해석을 통하여 경량화 설계에 대한 안정성을 확인하였다.

2. 6축 로봇의 구조설계 및 기구학 해석

2.1 구조설계

Figure 1 와 같은 중력 보상기를 적용한 6축 다관절 로봇 매니퓰레이터를 설계 하였다. 이는 기저축에서 말단축까지 롤-피치-피치-롤-피치-롤 관절구조로 설계되었다. 설계에 따라 직접 제작한 로봇의 구조는 Figure 2와 같다.

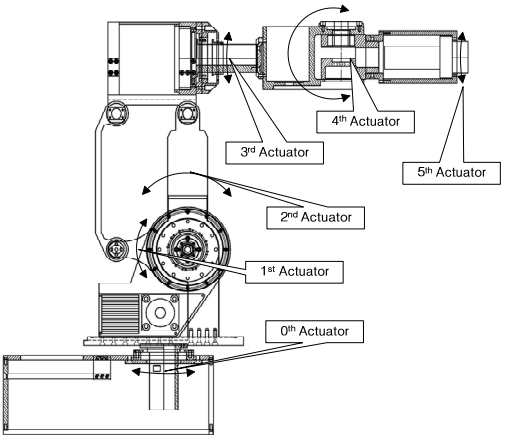


Figure 1: Structure of 6-axis robot manipulator

Figure 2: Design of 6-axis robot manipulato

본 연구에서의 로봇은 중력의 영향을 직접 받는 구조를 가진 다관절 로봇이다. 이는 그립퍼가 장착되는 말단으로부터 멀리 있는 관절일수록 모멘트가 커져서 더 많은 토크부하가 걸리며 중력으로 인한 부하토크가 가중된다. 본 논문에서는 토크부하가 가장 많이 걸리는 어깨부위의 두 관절구동기에 걸리는 부하를 보상하기 위하여 중력보상기를 적용하는 다관절로봇을 설계하였다.

2.2 기구학 해석

로봇의 안정적인 구동을 위해서 링크의 관절 변

수에 대한 기구학(kinematics) 해석이 필요하여 본 연구에서는 설계된 6축 로봇을 바탕으로 관절 링크에 대한 기구학 해석을 수행하였다. 로봇의 어깨 축에 해당되는 0축을 기준으로 하여 Denavit-Hartenberg 규약을 이용하여 **Figure 3**과 같이 좌표계를 설정하였다.

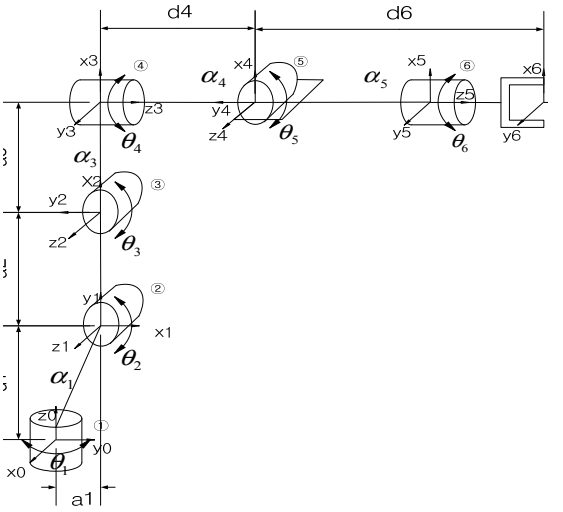


Figure 3: D-H coordinate of 6-axis manipulator

Table 1: Parameter of D-H coordinate of 6 axis robot

	α_i	a_i	θ_i	d_i
1	90°	a_1	θ_1	d_1
2	0°	a_2	θ_2	0
3	90°	a_3	θ_3	0
4	-90°	0	θ_4	d_4
5	90°	0	θ_5	0
6	0°	0	θ_6	d_6

D-H 규약을 이용하여 좌표를 설정하고 **Figure 3**의 $a_i, \alpha_i, \theta_i, d_i$ 에 해당하는 관절링크의 파라미터를 **Table 1** 과 같이 정리하였다. 이를 4개의 기본 변환 행렬의 곱을 이용한 식(1)의 동차변환 행렬 A_i 로 표현하고 순차적으로 곱한 전체 변환 행렬 T 를 구한 결과를 나타낸 것이다.

$$A_i = Rot_{z,\theta_i} \cdot Trans_{z,d_i} \cdot Trans_{x,a_i} \cdot Rot_{x,\alpha_i}$$
$$= \begin{bmatrix} \cos\theta_i & -\sin\theta_i \cdot \cos\alpha_i & \sin\theta_i \cdot \sin\alpha_i & a_i \cdot \cos\theta_i \\ \sin\theta_i & \cos\theta_i \cdot \cos\alpha_i & -\cos\theta_i \cdot \sin\alpha_i & a_i \cdot \sin\theta_i \\ 0 & \sin\alpha_i & \cos\alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

각각의 파라미터에 대한 전체 변환 행렬을 구하면 다음과 같다.

$$A_0^7 = A_1 A_2 A_3 A_4 A_5 A_6 = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & d_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & d_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & d_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

여기서

$$\begin{aligned}
r_{11} &= -c_6\{c_1 s_5 s_{23} - c_5(s_1 s_4 + c_1 c_4 c_{23})\} + s_6(s_1 c_4 - c_1 s_4 c_{23}) \\
r_{21} &= -c_6\{s_1 s_5 s_{23} + c_5(c_1 s_4 - s_1 s_4 c_{23})\} - s_6(c_1 c_4 + s_1 s_4 c_{23}) \\
r_{31} &= c_6(s_5 c_{23} + c_4 c_5 s_{23}) - s_4 s_6 s_{23} \\
r_{12} &= s_6\{c_1 s_5 s_{23} - c_5(s_1 s_4 + c_1 c_4 c_{23})\} + c_6(s_1 c_4 - s_1 s_4 c_{23}) \\
r_{22} &= s_6\{s_1 s_5 s_{23} + c_5(c_1 s_4 - s_1 c_4 c_{23})\} - c_6(c_1 c_4 + s_1 s_4 c_{23}) \\
r_{32} &= -s_6(s_5 c_{23} + c_4 c_5 s_{23}) - s_4 s_6 s_{23} \\
r_{13} &= c_1 c_5 s_{23} + s_5(s_1 s_4 + c_1 c_4 c_{23}) \\
r_{23} &= s_1 c_5 s_{23} - s_5(c_1 s_4 - s_1 s_4 c_{23}) \\
r_{33} &= c_4 s_5 s_{23} - c_5 c_{23}
\end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned}
d_x &= d_6\{c_1 c_5 s_{23} + s_5(s_1 s_4 + c_1 c_4 c_{23})\} + d_4 c_1 s_{23} + a_3 c_1 c_{23} + a_2 c_1 c_2 + a_1 c_1 \\
d_y &= d_6\{s_1 c_5 s_{23} - s_5(c_1 s_4 - s_1 c_4 c_{23})\} + d_4 s_1 s_{23} + a_3 s_1 c_{23} + a_2 c_2 s_1 + a_1 s_1 \\
d_z &= -d_6(c_5 c_{23} - c_4 s_5 s_{23}) - d_4 c_{23} + a_3 s_{23} + a_2 s_2 + d_1
\end{aligned}$$

여기서 각각의 관절의 방향정보를 담고 있는 r_{ij} 는 말단관절의 회전 변수이며, d_x, d_y, d_z 는 기저축인 0축을 기준으로 한 말단 관절의 위치벡터를 나타낸다.

2.3 로봇의 역기구학 해석

본 연구에 적용한 6축 로봇의 경우 구형 손목의 형태를 가진 형태로 일반적으로 이러한 구조의 역기구학 해를 구하기 위하여 역위치 기구학 문제와 역방향 기구학 문제로 디커플 시키는 방법을 사용한다. 즉 기구의 손목 축들의 만남의 위치인 손목

중심을 찾고 손목의 방향을 구하는 2개의 간단한 문제로 나눌 수 있다.

로봇의 말단장치의 위치가 d 점에서 주어진 방향 $R=(r_{ij})$ 를 가질 필요충분조건은 다음과 같다.

$$p_c = d - d_6 Rk \tag{4}$$

여기서 Rk 는 순기구학 해의 동차변환에서 z 축 방향의 회전변환 행렬을 의미한다.

말단 장치의 위치 벡터 d 의 성분이 d_x, d_y, d_z 이고, 손목 중심 p_c 의 성분이 p_x, p_y, p_z 이면, 각각의 손목중심의 성분은 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} p_x \\ p_y \\ p_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d_x - d_6 r_{13} \\ d_y - d_6 r_{23} \\ d_z - d_6 r_{33} \end{bmatrix} \tag{5}$$

여기서, r_{13}, r_{23}, r_{33} 와 d_x, d_y, d_z 는 말단 위치에 의해 주어진 좌표의 값이다.

주어진 손목 중심의 좌표를 이용하여 우선 기하학적인 방법을 이용하여 θ_1, θ_2, θ_3의 값을 다음과 같이 구할 수 있다.

먼저 Figure 4를 통하여 θ_1의 해를 구하고, Figure 5의 관계와 제2 코사인 법칙을 응용하여 $\theta_2 \sim \theta_3$의 기하학적 해를 구하였다.

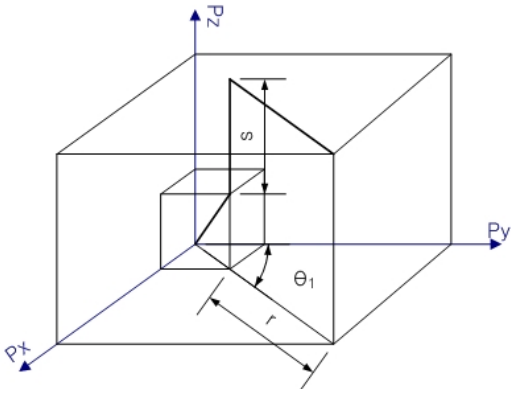


Figure 4: Diagram of robot about θ_1

$$\theta_1 = -A\tan(p_y, p_x) \tag{6}$$

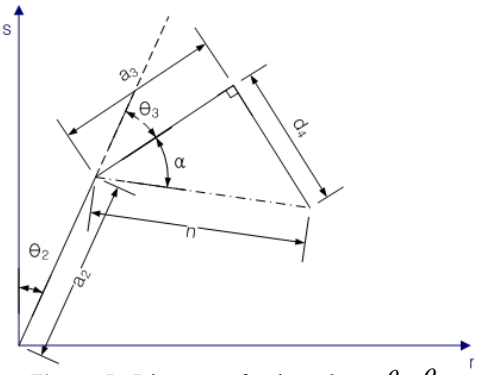


Figure 5: Diagram of robot about $\theta_2 \sim \theta_3$

$$\theta_2 = A\tan(s,r) - A\tan(a_2 + n\sin(\theta_3+\alpha), n\cos(\theta_3+\alpha)) \tag{7}$$

$$\theta_3 = A\tan(\sqrt{1-D^2}, D) + \alpha \tag{8}$$

여기서,

$$r = \sqrt{(p_x + a_1\sin\theta_1)^2 + (p_y - a_1\cos\theta_1)^2},\ s = p_z - d_1$$

$$D = \frac{r^2 + s^2 - a_2^2 - a_3^2 - d_4^2}{2a_2\sqrt{a_3^2 + d_4^2}}$$

$$\alpha = \frac{-a_3}{\sqrt{a_3^2 + d_4^2}},\ n = \sqrt{a_3^2 + d_4^2}$$

θ_3 의 경우 4절 링크 구조에서 θ_2 의 각 변위에 영향을 받으므로 실제로 제어에 사용해야 할 회전각 θ_{3r} 은 다음과 같다.

$$\theta_{3r} = \theta_2 + \theta_3 \tag{9}$$

나머지 관절 링크의 회전 변수는 z 축이 일치하는 구형 손목의 형태이며, 다음의 Euler 각도와 같은 형태를 가진다.

$$R_{z,\phi}R_{y,\theta}R_{z,\psi} = \begin{bmatrix} c_\phi & -s_\phi & 0 \\ s_\phi & c_\phi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c_\theta & 0 & s \\ 0 & 1 & 0 \\ -s_\theta & 0 & c_\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c_\psi & -s_\psi & 0 \\ s_\psi & c_\psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} c_\phi c_\theta c_\psi - s_\phi s_\psi & -c_\phi c_\theta s_\psi - s_\phi c_\psi & c_\phi s_\theta \\ s_\phi c_\theta c_\psi + c_\phi s_\psi & -s_\phi c_\theta s_\psi + c_\phi c_\psi & s_\phi s_\theta \\ -s_\theta c_\psi & s_\theta s_\psi & c_\theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_{11} & u_{12} & u_{13} \\ u_{21} & u_{22} & u_{23} \\ u_{31} & u_{32} & u_{33} \end{bmatrix} \quad (10)$$

이와 같은 형태로 나머지 각들을 구하면 다음과 같다

$$\theta_4 = A\tan(r_{13}s_1s_{23} - r_{23}c_1s_{23} + r_{33}c_{23}, r_{13}c_1 + r_{23}s_1) \quad (11)$$

$$\theta_5 = A\tan(-r_{13}s_1c_{23} + r_{23}c_1c_{23} + r_{33}s_{23}, \pm\sqrt{1-\{-r_{13}s_1c_{23} + r_{23}c_1c_{23} + r_{33}s_{23}\}^2}) \quad (12)$$

$$\theta_6 = A\tan(-\{-r_{11}s_1c_{23} + r_{21}c_1c_{23} + r_{31}s_{23}\}, -r_{12}s_1c_{23} + r_{22}c_1c_{23} + r_{32}s_{23}) \quad (13)$$

여기서 로봇링크의 길이는 각각 a1 = 42, d1 = 166, a2 = 238, a3 = 97, d4 = 269, d6 = 222(mm)이다.

2. 6축 로봇의 경량화 설계

3.1 중력보상기 이용한 로봇의 경량화 설계

기존의 중력보상기를 적용한 경량 설계구조의 6축 로봇에서는 **Figure 6**의 좌측과 같이 고중량의 이송을 위한 밸런서 구조를 채택하고, 좌우로 돌출된 형태의 고용량 모터를 사용하는 구조가 주로 사용되고 있다. 개발한6축 로봇은 **Figure 6**의 우측과 같은 고 중량의 밸런서를 대체하여 중력 보상기를 적용하고 좌우로 돌출된 모터 구조를 밸트 풀리 구조를 이용하여 내부에 장착하여 전체적으로 경량이면서 고중량의 이송이 가능한 6축 로봇 설계하였다.

6축 로봇에 적용한 중력 보상기의 경우 고정판을 중간에 위치 시키고 양쪽으로 회전판에 의한 중력 보상 효과를 얻는 구조를 채택하여 단순한 구조를 설계하였다. 제작한 6축 로봇은 **Figure 7**와 같다.

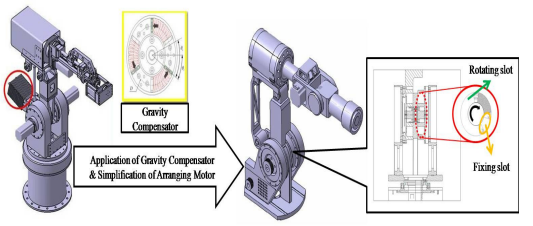


Figure 6: Concept of application of gravity compensator

Figure 7: Developed 6-axis robot

2.2 FEM 해석을 통한 경량 구조 설계

Figure 8과 **Figure 9**에서 6축 로봇의 가반 하중을 25kg으로 가정하고 이 경우 설계한 로봇링크의 구조해석을 위해서 ANSIS프로그램을 사용하여 FEM 해석을 수행하고 그 결과를 검토하였다. 해석에서 노드 수는 70050개, 요소 수는 469483개를 적용하고 설계한 6축 로봇의 링크는 알루미늄 합금으로 제작하였고 이의 물성치는 **Table 1**과 같다. 로봇의 팔을 펼쳤을 경우와 반대의 경우로 나누어서 두 번의 해석을 실시한 결과 각각의 최대 응력이 170.12MPa과 181.74MPa으로 물성치의 인장 및 압축 항복강도인 280MPa 이내의 범위에 들어오는 것을 확인할 수 있다. 결과적으로 설계한 로봇이 25kg가량의 가반 하중을 지지하였을 경우에 굽힘이나 파단과 같은 구조적 결함이 없음을 확인하였다.

Structural	
Young's Modulus	71000 MPa
Poisson's Ratio	0.33
Density	2.77e-006 kg/mm^3
Thermal Expansion	2.3e-005 1/°C
Tensile Yield Strength	280. MPa
Compressive Yield Strength	280. MPa
Tensile Ultimate Strength	310. MPa

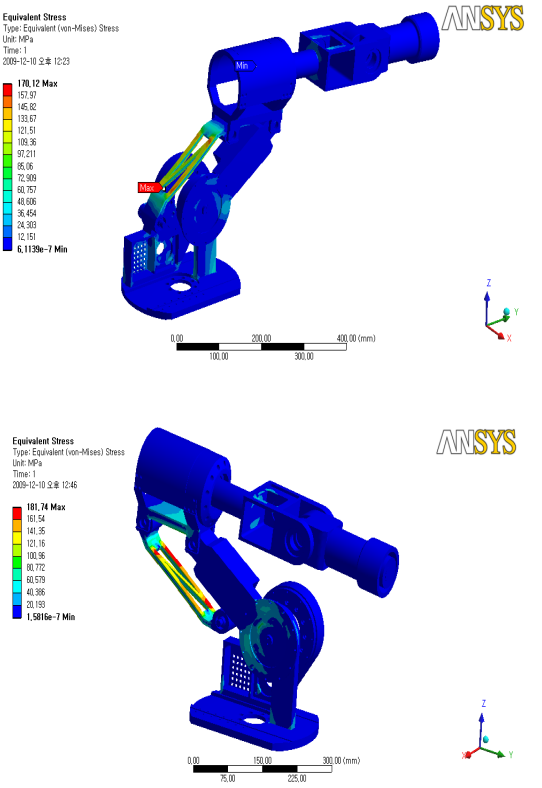


Figure 9: Equivalent stress of 6-axis robot

3. 결 론

일반적으로 사용되는 6축 로봇 매니퓰레이터의 관절축에 관절구동기의 토크성능을 높일 수 있는 중력보상기를 적용하여 경량이면서 고 중량의 이송이 가능한 로봇 매니퓰레이터를 개발하였다. 개발한 로봇의 어깨 두축에 모듈화 설계된 중력보상기를 적용하고 로봇의 구조 및 이의 순기구학 및 연기구학 해석을 수행하였다.

개발한 6축 로봇이 30kg의 경량이지만 매우 높은 가반하중인 25kg을 갖도록 로봇링크를 설계하고 이의 FEM 해석을 수행하였다. FEM해석 결과 개발한 로봇 링크의 굽힘이나 파단이 없는 안정한 구조임을 확인하였다.

후 기

본 연구는 교육과학기술부와 한국산업기술진흥원의 지역혁신인력양성사업으로 수행된 연구결과임

참고문헌

[1] Spong, M. W. and Vidyasagar, M., Robot Dynamics and Control, John Wiiley & Sons, 1989.

[2] Richard, P. Paul., Robot Manipulator: Mathematic, Programming, And Control, MIT Press, Cambridge, MA, 1982.

[3] Craig, J. J., Introduction to Robotics: Mechanic & Control, Addison- Wesley, Reading, MA, 1985.

[4] Tsai, L., Robot Analysis : The Mechanics of Serial and Parallel Manipulators, John Wiley & Sons, 1999.

[5] Stewart, D., "A platform with Six Degree of Freedom", Proc. Instn. Mech. Engrs, london, vol.180, no.15, pp.371-386, 1965.

[6] Minsky, M., Manipulator design vignettets, Research report 267, MIT AI LAB, 1972.

[7] Hunt, K. H., Kinematic Geometry of mechanism, Clarendon Press, Oxford, 1978.

[8] Mohamed, M. G. and Duffy, J., "A direct determination of instantaneous kinematics of fully parallel robotic manipulators", ASME J. Mech. Trans. Autom. Des., vol. 107, pp. 226-229, 1985.

[9] Ulrich, N., Kumar, V., "Passive mechanical gravity compensation for robot manipulators", Robotics and Automation Proceedings of IEEE International Conference, pp. 1536-1541 vol.2, 1991.

[10] Fattah, A. and Agrawal, S.K. "Gravity- balancing of classes of industrial robots", pp. 2872-2877, 2006.

[11] Na. W.H, A study on the Optimum Design of Biped Walking Robot applied to a Gravity Compensator, Master thesis, Korea maritime University, 2009.

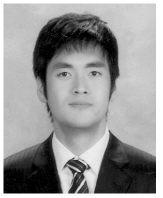
저 자 소 개

최형식(崔炯植)

1961년생, 1983년 고려대학교 기계공학과 졸업(학사), 1989년 Univ. of South Carolina 대학원 졸업(석사), 1993년 North Carolina State Univ 대학원 졸업(박사), 1993년 기계연구원(Post Doctor), 현재 한국해양대학교 기계정보공학부

조종래(趙琮來)

1959년 3월생, 1982년 부산대학교 기계공학 졸업(학사), 1984년 한국과학기술원 대학원 기계공학과 졸업(석사), 1993년 한국과학기술원 대학원 정밀공학과 졸업(박사), 1984년 1995년 한국중공업 기술연구소, 1999년 Post-Doc. (영국-Birmingham Univ.), 1995년 ~ 현재 한국해양대학교 기계정보공학부



허재관(許載官)

1982년생, 2008년 한국해양대학교 기계시스템 공학과 졸업(학사), 현재 한국해양대학교 대학원 기계공학과 재학(석사)

전지광(田智廣)

1983년생, 2009년 한국해양대학교 기계시스템공학과 졸업(학사), 2008. 3~현재 동대학원 기계공학과 재학(석사)