

중력보상기를 적용한 이족보행로봇 연구

A study on the Biped Walking Robot applying a Gravity Compensator

최형식^{1,✉}, 나원현², 김동호³, 추우현⁴
Hyeung-Sik Choi^{1,✉}, Won-Hyun Na², Dong-Ho Kim³ and U-Heon Chu⁴

1 한국해양대학교 기계정보공학부 (Department of Mechanical & Infor. Engineering, Korea Maritime Univ.)

2 ㈜현대로템 (Hyeundai-rotem Corp.)

3 한국해양대학교 기계공학과 (Department of Mechanical Engineering, Korea Maritime Univ.)

✉ Corresponding author: hchoi@hhu.ac.kr, Tel: 051-410-4297

Manuscript received: 2009.12.11 / Revised: 2010.4.2 / Accepted: 2010.5.2

In this paper, the structure of a new gravity compensator was studied, and the biped walking robot applying a gravity compensator was presented to improve the performance of the robot. The robot had 13 degree of freedom and is driven by the joint actuator with the gravity compensator. Each leg of the robot is composed of six joints three joints at the hip, a joint at the knee, and two joints at the ankle. The leg of the robot was designed to support 74kg weight including 30kg payload thanks to the gravity compensator. The performance of the robot was presented by reducing the payload applied to the leg joint of the robot thanks to the gravity compensator.

Key Words: Gravity Compensator (중력보상기), Biped Walking Robot (이족보행로봇)

1. 서론

Vucobratovic 이 이족보행로봇의 모델링 연구¹를 수행한 후에 모델링과 이론적 안정도 연구에 많은 대표적 연구들²⁻⁵이 있었다.

실제 휴머노이드나 이족보행로봇 모델을 바탕으로 한 연구로는 Shih 가 1996 년에 소형 8 자유도 80(cm) 이족보행로봇을 발표하고,⁶ 1997 년도에 최초의 휴머노이드 로봇인 주)혼다의 P3⁷를 기반으로 1998 년에 Yamaguchi 가 7 자유도 키 140(cm) 이족보행 로봇,⁸ 2000 년에 주)혼다에서 중형 휴머노이드 로봇 아시모,⁹ 2003 년에 가와다에서 중형 휴머노이드 로봇 HRP,¹⁰ 2004 년에 KAIST 와 KIST 에서 각각 중형 휴머노이드 휴보¹¹와 NBH-1, 한국해양대에서 중대형 휴머노이드 KUBIR,¹² 그리고 2005 년에 도요다 자동차에서 I-Foot¹³을 연구 개발

했다.

하지만, 현재까지 고중량물의 이송성능 개선에 대한 연구는 거의 없었다. 대부분이 50kg 내외의 경량으로 개발되어 보행능력 외에 작업물체의 이송능력이 거의 없다. 작업 물체의 이송능력을 보인 유일한 로봇인 HRP-2 는 8.5kg 의 상자를 양팔로 들고 일어서는 성능을 보였다. 사람이 타는 I-FOOT 로봇(이족보행로봇의 하체)은 중량이 200kg 이상인 단점이 있다.

인간의 생활공간에서 문턱, 층계 및 경사면과 같은 복잡한 환경에서 인간을 위한 고중량물 이송과 같은 작업을 할 수 있는 성능을 구비하는 것은 로봇의 실용적인 면에서 중요한 성능이다. 하지만, 현재까지 개발된 휴머노이드형 로봇은 보행과 경량의 작업물 만을 이송할 수 있는 능력을 구비하여 고가의 로봇 가격에 비해 성능에서 많은 한계

를 갖고 있어서 이는 시급히 해결해야 할 중요한 과제이다.

중력보상기의 시스템을 보면 모터 - 하모닉 드라이브(Harmonic Drive) 조립의 관절구동기와 압축 스프링, 스프링 압축돌기, 회전판, 고정판 등으로 기본구성을 갖는다. 압축 스프링의 압축변위에 따른 복원력을 이용하여 구동 시 요구되는 부하토크를 감쇄시켜 줌으로써 구동기에서 발생시켜야 할 구동토크를 줄여주는 효과를 얻을 수 있게 된다.

2. 중력보상기를 적용한 이족보행로봇의 구조

본 연구에서 개발한 로봇의 신장은 74cm, 몸무게는 42kg 이다. Fig. 5 와 같이 허리 1 자유도, 다리 당 6 자유도의 총 13 자유도를 갖는 휴머노이드 이족보행로봇이다. 허리의 1 자유도는 로봇의 보행 및 하중의 부하에 의한 무게 중심을 제어하는 역할을 담당하고 있다. 다리의 6 자유도는 yaw-roll-pitch-pitch-pitch-roll 의 구조로 되어 있어 인간과 유사한 보행을 할 수 있는 구조로 설계하였다.

Fig. 1 과 같이 다리의 12 자유도 중 pitch 운동을 하는 6 개의 관절과 고관절과 발목관절에서 roll

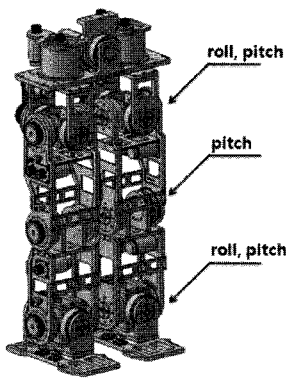
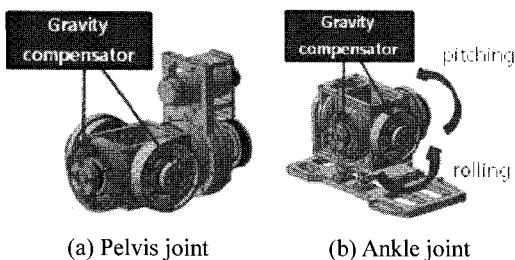


Fig. 1 Joint structure with gravity compensator



(a) Pelvis joint (b) Ankle joint
Fig. 2 Gravity compensator of the coxa and ankle joint

운동을 하는 관절구동기에 새롭게 고안한 중력보상기(Gravity Compensator)를 총 10 개의 관절에 적용하였다.

로봇의 관절구동기의 사양은 Table 1 과 같다. 중력에 영향을 받는 고관절의 일부와 무릎, 발목 관절 관절에는 감속기의 축에 중력보상기를 직결하여 Fig. 2 와 같이 설계하였다.

Table 1 Specification of the joint actuator for leg part

i	Joint	Motion	Motor [W]	Harmonic Ratio	Attachment of G.C.
0	Waist	roll	150	120 : 1	X
1	Pelvis-1	yaw	150	120 : 1	X
2	Pelvis -2	roll	150	120 : 1	O
3	Pelvis -3	pitch	150	160 : 1	O
4	Knee	pitch	150	160 : 1	O
5	Ankle-1	pitch	150	160 : 1	O
6	Ankle -2	roll	150	160 : 1	O

G.C. : Gravity Compensator

3. 중력보상기의 구성

Fig. 3 의 이족보행로봇의 관절에 적용된 중력보상기는 Fig. 3 과 같이 고정판, 회전판, 스프링 압축돌기, 및 압축스프링 등으로 구성된다. 압축스프링의 압축변위에 따른 복원력을 이용하여 구동 시 요구되는 부하토크를 감쇄시켜 줌으로써 구동기에서 발생시켜야 할 구동토크를 줄여주는 효과를 얻을 수 있게 된다. 결과적으로 압축스프링의 복원력으로 발생하는 보상력 만큼 관절구동기의 성능이 향상된다.

중력보상기는 모듈로 구성되어 Fig. 4 와 같이 모터나 감속기에 직결하여 로봇의 관절구동기로 적용될 수 있는 구조이다.

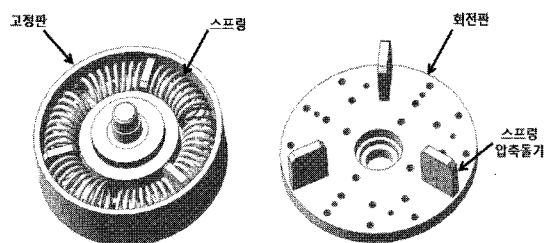


Fig. 3 Structure of gravity compensator

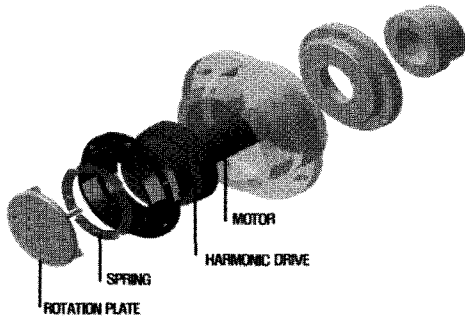


Fig. 4 Joint actuator with gravity compensator

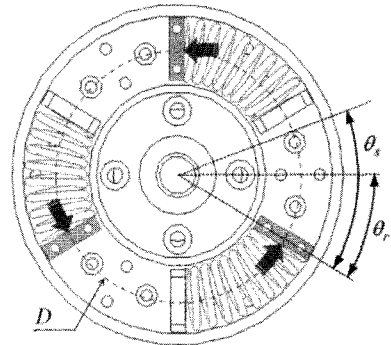


Fig. 5 Structure of gravity compensator

3.1 중력보상기의 역학 해석

식(1)은 중력보상기의 회전판에 연결된 링크에 중력으로 인하여 관절구동기에 가해지는 부하토크와 중력보상기 내의 스프링 압축으로 인해 발생한 반발 모멘트 간의 관계를 나타내는 식이다.

$$T_m = M_p - M_s \tag{1}$$

여기서 T_m 는 구동모터의 출력 토크이고 M_p 는 외부 부하로 인하여 로봇의 관절구동기의 구동모터에 걸리는 모멘트이고 M_s 는 스프링의 압축으로 인해 발생한 반발 모멘트로 이의 차는 관절구동기의 구동모터에 대한 부하로 표현된다. 식 (1)을 구체적으로 살펴보면 다음과 같다.

Fig. 5 에서 중력부하로 인하여 로봇 링크가 회전하여 스프링을 압축하면 스프링을 압축한 각도의 양 $\theta_s - \theta_r$ 에 비례하여 스프링의 반발력 F_s 이 발생한다. 여기서 θ_s 는 고정판의 원주 홈을 따라 설치한 압축스프링의 회전각의 총 길이를 나타낸다.

$$F_s = kn(\theta_s - \theta_r) \tag{2}$$

여기서 n 은 압축 스프링의 개수이다, 이 스프링 반발력은 다음의 모멘트 식으로 중력으로 인한 부하토크를 감소시키는 역할을 한다.

$$M_s = DF_s/2 \tag{3}$$

여기서 D 는 회전축으로부터의 스프링 유효직경이다.

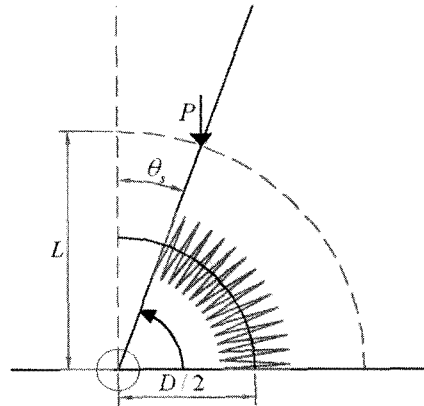


Fig. 6 Force/torque relation of gravity compensator

Fig. 6 은 로봇의 링크와 중력보상기 사이의 역학 구조를 나타내는 것이다.

외부 부하 P 로 인하여 로봇의 관절구동기의 구동모터에 걸리는 모멘트는 다음과 같다.

$$M_p = PL \cos \theta_r \tag{4}$$

4. 이족보행로봇의 기구학 및 중력보상기 적용한 관절구동기 해석

4.1 기구학 해석

본 논문에서는 로봇의 기구학을 해석하기 위해서는 각 링크의 좌표계를 D-H(Denavit-Hartenberg) 규약을 이용하여 정리하였다.

Fig. 7은 로봇의 각 관절에 D-H 좌표계를 설정한 그림이다. 이의 매개변수를 정리하면 Table 2와 같다.

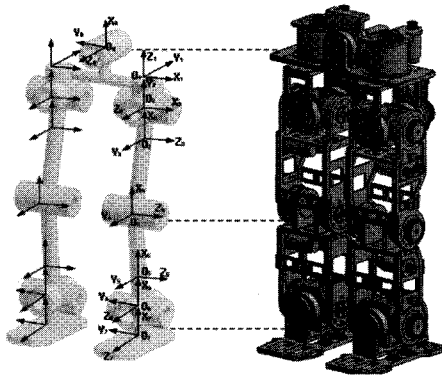


Fig. 7 D-H coordinates for the Robot

Table 2 Link parameter for the Robot

Link	a_i	α_i	d_i	θ_i
1	a_1	90°	0	θ_1^*
2	0	-90°	d_2	θ_2^*
3	a_3	90°	0	θ_3^*
4	a_4	0	0	θ_4^*
5	a_5	0	0	θ_5^*
6	a_6	-90°	0	θ_6^*
7	a_7	0	0	θ_7^*

이족보행로봇의 관절구동기의 부하토크에 대한 해석을 하였다. 보행시에 지지하는 고관절, 무릎관절, 발목관절 관절구동기의 용량 설계를 위해 각 관절에 가해지는 부하토크를 계산하였다.

로봇의 허리 관절에 축(Z_0), 고관절의 yaw 운동 축(Z_1)을 제외한 중력보상기를 적용한 관절구동기의 회전 축($Z_2 \sim Z_6$)을 중심으로 발생하는 관성모멘트를 Fig. 8 과 같이 부하토크가 많이 걸리는 자세의 단순화시킨 모델에 적용하여 계산하였다.

Fig. 8 의 각 Z_i 는 각 축의 회전중심, E_i 는 질량중심, a_i , b_i 는 회전하는 링크의 해당 길이, d_i 는 회전중심과 질량중심의 거리, θ_i 는 회전축을 중심의 동작 변위를 나타낸다. Table 3 은 각 관절을 연결하는 링크의 파라미터 값을 나타낸 것으로 m_i 는 각 회전하는 링크의 질량이다.

각 링크의 관성모멘트를 구하기 앞서 다음과 같은 조건과 가정을 하였다.

- ① 구동축은 회전중심에 위치 함
- ② 최대 변위 θ_i 만큼 회전하는데 걸리는 회전시간은 0.5 s
- ③ 가감속 시간은 0.15 s

④ 회전축 마찰저항토크(T_f)는 0.5 Nm
Table 4 는 각 링크의 관성모멘트(I_{ei}) 값을 나타낸 것이며 여기서 i 는 각 관절의 번호를 나타낸다.

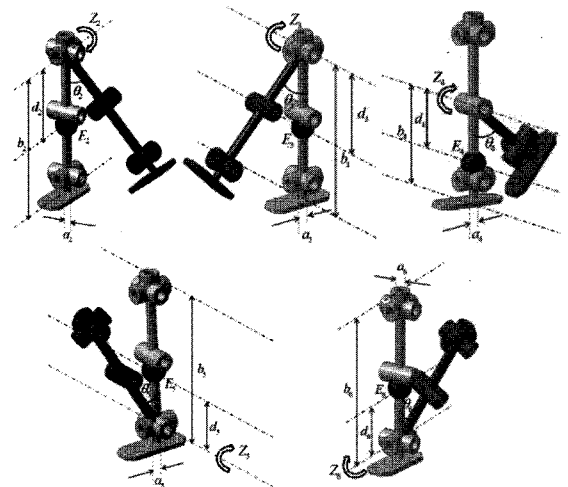


Fig. 8 $Z_{i(2-6)}$ for the joint

Table 3 Parameters of the Supported Joint

i	a_i [mm]	b_i [mm]	d_i [mm]	θ_i [°]	m_i [kg]
2	156.5	627.5	319.503	5.0	55.503
3	115.0	627.5	319.503	10.0	55.503
4	115.0	849.747	538.405	10.0	61.818
5	115.0	1154.431	685.816	5.0	72.313
6	156.5	1154.431	685.816	5.0	72.313

Table 4 Moment of inertia of the Supported Joint

i	Joint	Motion	I_{ei} [$kg \cdot m^2$]
2	Pelvis-2	roll	7.600
3	Pelvis-1	pitch	7.5483
4	Knee	pitch	21.708
5	Ankle-1	pitch	42.123
6	Ankle-2	roll	42.191

4.2 각 관절의 각속도 및 각가속도 해석

로봇 관절의 각속도를 일반적으로 많이 적용하는 Fig. 9 와 같은 사다리꼴 궤적을 적용하였다. 여기서 로봇의 관절의 총 회전각도는 $K(rad)$, 가감속 시간은 t_a (s), 각속도는 $\omega_c(rad/s)$, 총 회전시

간은 t_i (s), 각가속도는 α (rad/s) 라고 하면 다음과 같은 식이 성립한다.¹⁴

$$K = \frac{t_a \omega_c}{2} + (t_i - 2t_a)\omega_c + \frac{t_a \omega_c}{2} \quad (5)$$

$$\omega_c = \frac{K}{t_i - t_a} \quad (6)$$

$$\alpha = \frac{\omega_c}{t_a} \quad (7)$$

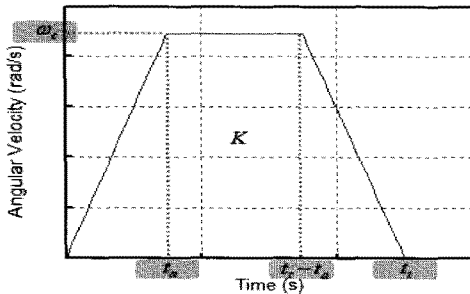


Fig. 9 Time - angular velocity graph

Table 5 Angular velocity, Acceleration of the Supported Joint

i	K_i [rad]	t_i [s]	t_a [s]	ω_{ci} [rad/s]	α_i [rad/s ²]
2	0.08726	0.5	0.15	0.249	1.662
3	0.17453	0.5	0.15	0.498	3.324
4	0.17453	0.5	0.15	0.498	3.324
5	0.08726	0.5	0.15	0.249	1.662
6	0.08726	0.5	0.15	0.249	1.662

Table 5 는 식 (8)와 (9)를 통해 얻어진 각 관절의 각속도, 각가속도 값을 나타낸 것이다.

4.3 각 관절의 관성력에 의한 토크 해석

각 관절구동기에 작용하는 토크는 크게 가속운동, 등속운동, 감속운동에 대한 토크로 3 단계로 나눌 수 있다. 여기서 관성력에 의한 토크(T_i), 가속에 필요한 토크($T_{\alpha+}$), 등속에 필요한 토크(T_f), 감속에 필요한 토크($T_{\alpha-}$)는 다음과 같다. 식 (7)의 각가속도 α 가 식 (9)의 관성력에 의한 토크에 적용된다.

$$T_{\alpha+} = T_i + T_f \quad (8)$$

$$T_i = I_e \cdot \alpha \quad (9)$$

$$T_c = T_f = 0.5N \cdot m \quad (10)$$

$$T_{\alpha-} = T_f - T_i \quad (11)$$

Table 6 은 식 (10)~(13)를 통해 얻어진 각 관절 구동기의 토크 값을 나타낸 것이다.

Table 6 Torque of the Supported Joint

i	T_i [N·m]	$T_{\alpha+}$ [N·m]	T_c [N·m]	$T_{\alpha-}$ [N·m]
2	12.633	13.133	0.5	-12.134
3	25.09	25.595	0.5	-24.594
4	72.166	72.666	0.5	-71.666
5	70.017	70.517	0.5	-69.517
6	70.130	70.630	0.5	-69.630

$$T_w = W_i \times d_i \times \sin \theta_i = m_i g \times d_i \times \sin \theta_i \quad (12)$$

Table 7 은 각 관절에 걸리는 평균토크(T_{rms}), 최대토크(T_{max}) 값을 나타낸 것이다.

Table 7 Rms and max torque of the Supported Joint

i	Joint	Motion	T_{rms} [N·m]	T_{max} [N·m]
2	Pelvis-2	roll	9.856	16.383
3	Pelvis-3	pitch	19.195	32.092
4	Knee	pitch	49.771	79.903
5	Ankle-1	pitch	47.483	79.605
6	Ankle-2	roll	47.562	79.718

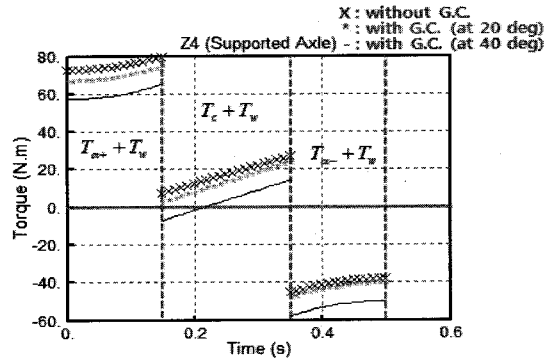
본 논문에서는 제안한 중력보상기를 적용하였을 때, 로봇의 중력으로 인한 자중과 가속도로 인하여 관절에 가해지는 부하토크를 계산하였다. 이 부하토크 중에서 중력으로 인한 부하토크를 감소시키기 위하여 중력보상기를 고안하여 적용하였다. 중력보상기의 특성은 식 (1)~(4)에 기술하였다. 중

력보상기를 적용하였을 때의 부하토크 계산 내용은 다음과 같다.

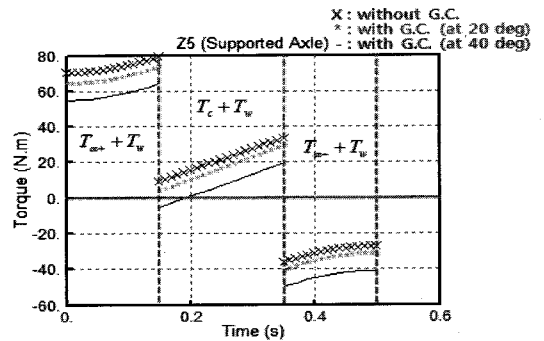
각각의 관절구동기에 적용된 증력보상기는 3개의 스프링, 스프링 상수 k , $6.54 \text{ N}\cdot\text{mm}$, 그리고 직경 $D=66 \text{ mm}$ 의 파라미터가 사용되었다. Table 8은 부하토크 저감효과를 높이기 위해 초기에 압축각(θ_s)이 20° 로 구성하였고 이때, 각 증력보상기가 적용된 구동축 관절에 걸리는 평균토크(T_{rms-GC}), 최대토크(T_{max-GC}) 값을 나타내었다.

Table 8 Rms and max torque of the Supported Joint (at $\theta_s=40^\circ$)

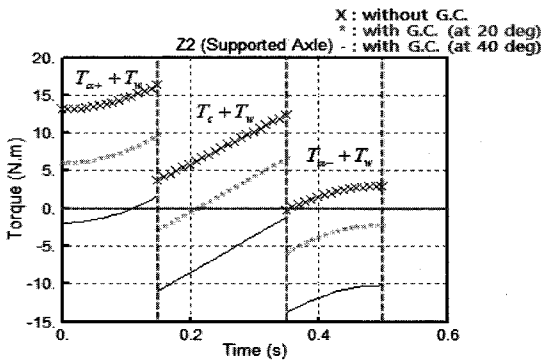
i	Joint	Motion	T_{rms-GC} [N·m]	T_{max-GC} [N·m]
2	Pelvis-2	roll	7.75	(-)13.68
3	Pelvis-3	pitch	9.87	17.95
4	Knee	pitch	45.45	65.79
5	Ankle-1	pitch	42.06	65.09
6	Ankle-2	roll	42.15	65.20



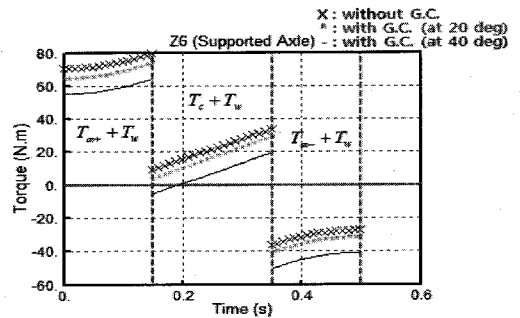
(c) Torque for Z_4 axis of knee



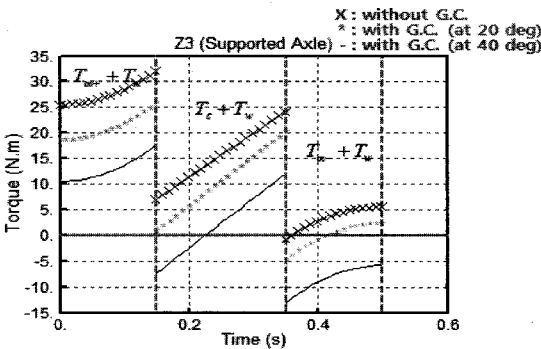
(d) Torque for Z_5 axis of ankle - 1



(a) Torque for Z_2 axis of Pelvis - 2



(e) Torque for Z_6 axis of ankle - 2



(b) Torque for Z_3 axis of Pelvis - 3

Fig. 10 Torques for $Z_{i(2-6)}$ axis

Table 9는 초기 압축각(θ_s)이 40° 일 때 각 증력보상기 적용으로 평균토크와 최대토크의 감소율을 나타낸 것이다.

초기 압축각(θ_s)이 40° 일 때, 측방 모멘트를 받는 Pelvis-3 관절의 경우에 평균토크의 감소율이 48.6%로 대폭 감소되며 로봇의 전체 중량에 해당하는 72kg의 하중을 받는 발목관절-1, 2의 경우 평균토크의 감소율이 11.4%, 11.4% 이므로 발목관절-1, 2에서 약 8.2kg에 해당하는 부하토크가 증력

Table 9 Rms and max torque of the decrement (at $\theta_s = 40^\circ$)

<i>i</i>	Joint	Motion	Decrease rate of even torque (%)	Decrease rate of maximum torque (%)
2	Pelvis-2	roll	21.39	16.51
3	Pelvis-3	pitch	48.61	44.08
4	Knee	pitch	8.68	17.67
5	Ankle-1	pitch	11.42	18.24
6	Ankle-2	roll	11.39	18.21

보상기의 보상력으로 상쇄되어 관절구동 모터에 가해지는 부하가 경감되어 중력보상기를 적용하면 구동 모터의 사양이 더 작은 것으로 설계할 수 있다.

Table 7~9 에서 초기 압축각 (θ_s)이 20° 에서 40° 으로 증가했을 때 고관절-2 을 제외하고 모든 관절에서는 평균토크와 최대토크의 감소율이 증가한 것을 알 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 이족보행로봇 다리의 중량물 지지성능을 구조적으로 개선할 수 있는 중력보상기를 고안, 적용하여 13 자유도의 이족보행로봇을 설계하였다. 로봇의 여러 회전관절 중에서 중력으로 인하여 부하를 많이 받는 10 개의 피칭관절 구동축에 중력보상기를 적용하였다.

중력보상기의 구조와 성능에 대한 해석과 이를 적용한 관절구동기의 역학 해석을 통해 적용한 중력보상기의 성능을 검증하였다. 로봇의 보행동작에서 부하가 가장 많이 걸리는 형태로 단순화하여 다리 관절에 가해지는 부하토크를 계산하였다. 중력보상기를 적용하였을 때, 관절마다 차이는 있지만, 골반관절의 경우에는 48.6%까지 부하가 감소됨을 확인할 수 있었다. 따라서 관절구동 모터 및 감속기의 용량이 작은 것을 사용할 수 있는 중요한 성능 개선을 이룰 수 있다.

중력보상기의 장점은 감속기와 달리 속도는 유지하면서 구동모터에 가해지는 부하는 감소시킬 수 있어서 보행로봇이 무거운 작업 물체를 지속적으로 이송할 때에 중력보상기의 부하토크 저감성능은 더욱 크게 될 것이다.

후 기

본 연구는 교육과학기술부와 한국산업기술재단의 지역혁신인력양성사업으로 수행된 연구결과임.

참고문헌

1. Vucobratovic, M. and Stepanenko, M., "Mathematical models of general anthropomorphic systems," *Mathematical Biosciences*, Vol. 17, No. 3-4, pp. 191-242, 1973.
2. Gubina, F., Hemami, H., and McGhee, R. B., "On the dynamic stability of biped locomotion," *IEEE Trans. on Biomed. Engineering*, Vol. 21, No. 2, pp. 102-108, 1974.
3. Yamaguchi, J., Takanish, A. and Kato, I., "Development of a biped walking robot compensating for three-axis moment by trunk motion," *IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and System*, pp. 561-566, 1993.
4. Lim, S. H., "A study on the implementation of zero moment point control for IWR-III bipedwalking robot," *Department of Electrical Eng., Ph.D Dissertation*, Inha University, 1999.
5. Tzafestas, S. G., Krikochoritis, R. E. and Tzafestas, C. S., "Robust-Adaptive Gait Control of a9-Link Biped Robot," *Systems Analysis Modelling Simulation*, Vol. 31, No. 4, pp. 247-304, 1998.
6. Shih, C., "Analysis of the dynamics of a biped robot with seven degrees of freedom," *Proc. IEEE International Conf. on Robotics and Automation*, Vol. 4, pp. 3008-3013, 1996.
7. Hirai, K., Hirose, M., Haidawa, Y. and Takenaka, T., "The development of honda humanoidrobot," *Proc. IEEE International Conf. on Robotics and Automation*, pp. 1321-1326, 1998.
8. Yamaguchi, J., Nishino, D. and akanishi, A., "Realization of Dynamic Biped Walking Varying Joint Stiffness Using Antagonistic Driven Joints," *Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 2022-2029, 1998.
9. <http://world.honda.com/ASIMO/>
10. Harada, K., Kajita, S., Saito, H., Morisawa, M., Kanehiro, F., Fujiwara, K., Kaneko, K. and Hirukawa, H., "A Humanoid Robot Carrying a Heavy Object,"

- Proc. IEEE International Conf. on Robotics and Automation, pp. 1724-1729, 2005.
11. Kim, J., Park, I., Lee, J., Kim, M., Cho, B. and Oh, J., "System Design and Dynamic Walking of Humanoid Robot KHR-2," Proc. IEEE International Conf. on Robotics and Automation, pp. 1443-1448, 2005.
 12. Choi, H. S. and Park, C., "Dynamics Modelling and Analysis of a Biped Walking Robot Actuated by a Closed-Chain Mechanism," J. of Robotic Systems, Vol. 21, No. 12, pp. 635-649, 2004.
 13. <http://www.toyota.co.jp>
 14. <http://www.copperhillmedia.com/VisualSizer/VisualSizerMotionProfile.html>