

인체형 이족 보행로봇의 개발

최형식*(한국해양대 기계·정보공학부), 박용헌(한국해양대 대학원 기계공학과),
이호식(한국해양대 대학원 기계공학과), 김영식(한국해양대 대학원 기계공학과)

Development of Human-Sized Biped Robot

Hyeung-Sik Choi(Mech·infor. Eng. Dept. KMU), Yong-Heon Park(Mech·infor. Eng. Dept. KMU),
Ho-Sik Lee(Mech·infor. Eng. Dept. KMU), Yeung-Sik Kim(Mech·infor. Eng. Dept. KMU)

ABSTRACT

We developed a human-sized BWR(biped walking robot) driven by a new actuator based on the ball screw which has high strength and high gear ratio. The robot overcomes the limit of the driving torque of conventional BWRs. Each leg of the robot is composed of three pitch joints and one roll joint. In all, a 10 degree-of-freedom robot with two balancing joints was developed. The BWR was developed to walk autonomously such that it is actuated by small torque motors and is boarded with DC battery and controllers. In the performance test, the BWR performed nice motions of sitting-up and sitting-down. Through the test, we could find capability of high performance in biped-walking.

Key Words · Biped Walking Robot(이족 보행로봇), Ball Screw Actuator(볼나사 구동기), Four bar link(4절링크)

1. 서론

인간의 존엄성과 가치에 대한 관심이 높아짐에 따라 원자력 발전소나 유해가스가 존재하는 장소에서 인간이 수행할 작업을 대항할 이동로봇의 개발에 대한 요구가 증가하였다. 1960년대 후반 이족 보행로봇에 관한 모델링이 제안된 이후 이족 보행로봇에 대한 많은 연구가 수행되었다. 초기형태의 이론적 연구로서 이족 보행로봇의 모델링과 제어는 로봇의 외형에 따라 다리부단 고려한 연구와 다리부와 균형관절을 포함한 보다 복잡한 형태의 연구형태로 분류할 수가 있고 이에 대해서도 많은 연구들이 수행되었다[1-2]. 이족 보행로봇이 다양한 환경 하에서 보행하기 위해서는 걸음주기나 보폭, 방향전환 등과 같은 걸음새를 변형할 수 있어야 한다. 그러나 하체의 다리부로만 구성된 이족 보행로봇은 걸음새 변경능력이 미비하거나 훨씬 복잡한 알고리즘을 필요로 하며, 보행 전 균형점 제거나 균형운동을 행하기 어려운 단점이 있다. 이를 해결하기 위하여 상부에 균형관절을 갖는 형태의 이족 보행로봇에 대한 연구들이 수행되었다[3]. 1990년대 후반에 걸음새나 로봇의 몸체 추진 제력에 관심을 보여왔고 기존의 연구가 갖고 있는 제약을 극복하고자 하는 연구도

많이 수행되었다. 그러나 이들은 고자유도 시스템의 운동방정식의 복잡성으로 수학적 모델의 정립이 어렵고, 이로 인하여 다양한 걸음새를 구현하기에는 제한적이었다. 이러한 기존 연구들의 한계점을 극복하고 보다 다양한 걸음새를 안정되게 구현하는 이족 보행로봇의 개발에 수학적 모델의 유도가 필수적이지만 여러 연구 결과에서 나타난 바와 같이 어려운 난제로 남아있다.

이론적 모델링을 통한 접근방법과는 달리 보행을 위한 구동 메커니즘의 설계와 실험적인 방법으로 접근한 연구들이 있다. 이러한 실험적 방법에는 무거운 자중을 지지하며 각 다리관절을 구동하는 구동기의 설계 및 제작과 상/하체 관절, 균형 및 보행을 제어하는 제어시스템 구성의 두 방법이 고려되어야 한다. 구동기에 대한 초기 연구로는 유압시스템을 사용하여 다리를 구동하는 연구가 있었으나, 유압은 무거운 중량, 큰 부피 외에도 유지나 관리가 어려워 거의 대부분 감속기를 이용한 모터를 직접관절에 부착하는 구조로 되어있다. 하지만, 이 방법은 구동모터의 구동토크 한계와 감속기의 강성의 한계로 구동토크 변화율의 한계 및 로봇의 크기에 제한을 둘 수 밖에 없는 구조적 한계점을 가지고 있다[4]. 이를 해결하기 위하여 스프링 메커니즘을 이용하여 구동기

의 토크를 높이는 연구[5]가 수행되었지만 여전히 만족할 만한 강성을 얻지 못하고 있다 따라서 규모에 있어서 소형이며 고 강성을 가지며 높은 기어비로 고 토크를 구현할 수 있는 구동기의 개발 없이는 이족 보행로봇의 원활한 보행은 한계가 있고, 따라서 개발은 의미를 잃게 된다.

본 논문에서는 기존에 개발된 이족 보행로봇의 토크와 안정성의 한계점을 극복하기 위하여 고 강성을 가지며 높은 기어 비를 갖는 볼 나사를 사용하는 새로운 구조의 관절 구동기를 채용한 인체형 10 자유도 이족 보행로봇 개발에 대한 연구결과를 나타내었다. 개발된 로봇의 각 다리는 2자유도의 발목관절과 무릎 및 힙관절로 구성되고, 상체는 2자유도의 균형관절을 갖는 기구학적 구조를 갖는다

DC 서보모터를 채택한 볼나사를 구동원으로 하고, 자율이동을 목표로 모터드라이버와 인터페이스 부분은 직접 제작하였다. 다리의 운동과 보행실험을 통하여 개발된 이족 보행로봇의 성능을 검토하였다

2. 이족 보행로봇의 기구 메카니즘

본 연구를 통하여 개발된 이족 보행로봇의 다리 관절은 Fig.1과 같이 발목, 무릎 및 힙관절로 구성된다 이 관절들은 각각 4절링크로 구성이 되며, 볼나사를 구동하여 관절각을 변화시키는 것이 목적이므로 각각의 링크들에서 볼나사의 직선변화와 관절각의 관계가 필요하다

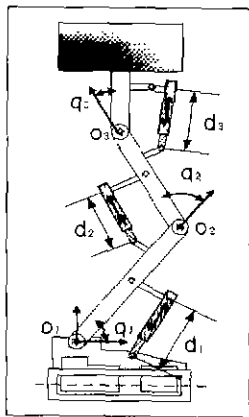


Fig. 1 다리의 구조

발목의 기구학적 구조는 Fig 2에서 보는바와 같이 4절링크를 이용하여 직선운동을 회전운동으로 변환하는 구조이다. 여기서 a_3 는 발목관절과 무릎관절을 연결하는 종아리 부분이고 a_4 는 발에 해당하는 부분이다 운동 형태는 4절링크에서 d_1 에 해당하는 볼나사가 미끄럼 운동을 할 때 발목관절에 해당하는

회전각 q_1 이 회전하는 구조이다. 볼나사의 변위를 나타내는 d_1 과 회전각 q_1 의 관계는 다음과 같다

Fig.2에서 l_1 을 이용한 양쪽의 삼각형에 코사인 법칙을 적용하면 다음과 같은 회전각 β_1 과 직선거리 d_1 과의 관계를 구할 수 있다

$$\beta_1 = \arccos\left(\frac{A_1 - a_1^2 + B_1 d_1}{C_1}\right) \quad (1)$$

$$A_1 = a_3^2 + a_4^2 - a_2^2, \quad B_1 = 2a_2 \cos \alpha_1, \quad C_1 = 2a_3 a_4$$

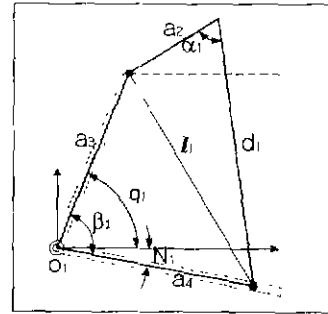


Fig. 2 발목관절의 4절 링크 구조

Fig.2에서 우리가 원하는 직선이동거리 d_1 과 회전각 q_1 과의 관계는

$$q_1 = \beta_1 - N_1 \quad (2)$$

으로 나타낸다

무릎관절과 힙관절 부분에 적용된 4절 링크는 발목관절의 구조와 유사하므로 식 (1)과 식 (2)를 참조한다 무릎관절의 볼나사에 해당하는 직선이동변위 a_2 와 회전각 β_2 의 관계와 힙관절의 a_3 와 β_3 의 관계식은 다음과 같다.

$$\beta_2 = \arccos\left(\frac{A_2 - a_2^2 + B_2 d_2}{C_2}\right) \quad (3)$$

$$A_2 = b_3^2 + b_4^2 - b_2^2, \quad B_2 = 2b_2 \cos \alpha_2, \quad C_2 = 2b_3 b_4$$

$$q_2 = \pi - \beta_2 - N_2 \quad (4)$$

$$\beta_3 = \arccos\left(\frac{A_3 - a_3^2 + B_3 d_3}{C_3}\right) \quad (5)$$

$$A_3 = c_3^2 + c_4^2 - c_2^2, \quad B_3 = 2c_2 \cos \alpha_3, \quad C_3 = 2c_3 c_4$$

$$\beta_3 = \pi - N_3 - N_{324} - \beta_3 \quad (6)$$

이상과 같이 4절링크의 제어입력에 해당하는 볼나사의 직선이동거리와 이로 인해 제어되는 관절각의 관계를 유도하였다.

3. 제어부

이족 보행로봇의 4절링크를 제어하기 위한 볼나사의 구동은 모터로 이루어진다. 본 연구에서 개발하는 이족 보행로봇은 자율보행을 목적으로 하므로 구동모터는 소형 DC 서보모터를 채용하였다. 모터의 구동을 제어하기 위하여 상용화 되어있는 모션제어기를 이용하였고, 로봇의 보행을 위한 상위제어기로는 펜티엄II PC를 사용하였다.

이족 보행로봇의 각 다리는 Pitch축 3개와 Roll축 1개로 구성하여 두 다리가 8자유도로 구성되고, 균형을 잡기 위한 관절은 각각 Pitch축 1개와 Roll축 1개로 구성하여 총 10자유도로 구성된다. 이들 10축의 제어기로 모션 제어기인 삼성의 MMC-PV8을 2대 사용하였다. MMC 제어기는 Proportional-Integral-Derivative-Feedforward(PIDF)제어 Loop를 구현한다.

DC 서보모터의 전원공급장치인 드라이브와 연결하여 제어기와 드라이브를 연결하는 인터페이스 부분은 직접 제작하였다. 인터페이스 부분에서 Bipolar to Unipolar Transform Part는 Bipolar 속도명령을 Unipolar 속도명령과 방향전환신호로 변환하는 부분이다. PWM Generator Part는 OPamp를 이용하여 삼각파와 Bipolar to Unipolar Transform Part에서 발생한 Unipolar 속도명령을 비교하여 PWM 신호를 발생한다. DC 모터 제어에서는 기본적으로 구동 및 정지시에 속도의 가/감속, 정역 전환시의 Time Delay와 전원분리가 필수적이다. Time Delay Part는 시간지연을 위한 부분으로 Monostable Multivibrator를 이용하여 가변저항으로 지연시간을 결정할 수 있게 제작되었는데 고 부하를 받고 있는 DC 모터의 제어에는 반드시 있어야 할 부분이다. 또 Encoder 신호와 Limit Sensor 신호를 MMC 제어기에 전달하는 Limit & Encoder Transmission Part를 구성하였고, Isolator Part는 시스템에서의 노이즈나 큰 부하로 인해 모터의 구동시 발생하는 고전류의 역류를 방지하기 위한 부분으로 상위제어기와 모션 제어기 그리고 제작된 인터페이스 부분의 안정성을 고려하여 Photo-coupler로 구성되었다.

모터드라이브는 DC 서보모터에 직접적으로 전류를 공급하는 부분으로 고 효율을 위해 전력소자의 방열과 전원분리가 필요한 부분이다. 본 연구에서는 로봇의 자율보행을 목적으로 하기 때문에 자체 동력원을 가진다. 따라서 전원분리는 비교적 고가인 DC to DC Converter를 사용하지 않고 소용량의 동력원을 여러개 사용함으로써 이를 대체할 수 있다.

4. 10자유도 이족보행로봇의 구성 및 보행실험

4.1 10자유도 이족보행로봇의 구성

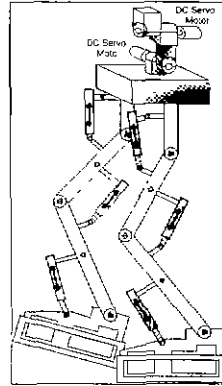


Fig 3 10자유도 이족 보행 로봇 전체개략도



Pic. 1 이족 보행로봇의 실제사진

본 연구에서 개발하는 10자유도를 갖는 이족 보행로봇은

- 볼나사를 채용한 4절링크 구조의 관절로 이루어진 다리부분의 6축
 - 발의 Roll을 담당하는 감속기가 부착된 Motor를 직접 연결한 2축의 회전관절
 - 균형을 잡기 위하여 감속기가 부착된 Motor를 직접 연결한 두개의 회전관절
- 로 기구 메카니즘이 구성되었고, 이에 대한 개략도는 Fig 3에, 제작된 로봇의 실제사진은 Pic 1에 나타나 있다.

제어부는

- 상용화되어있는 Motion 제어기(MMC-PV8)
- 자체 제작된 인터페이스 부분
- 자체 제작된 Motor Drive 부분

링크/축	Right				Left				관절수	
	foot (Roll)	ankle	knee	pelvis	foot (Roll)	ankle	knee	pelvis	Pitch	Roll
DC Servo Motor	90W	90W	90W	90W	90W	90W	90W	90W	90W	90W
Gear Ratio	216:1	48:1	48:1	48:1	216:1	48:1	48:1	48:1	126:1	126:1
Encoder Resolution (21)	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000
positive to negative limit[pulse]	30000	26900	25130	25200	30000	26870	25100	22600	21000	21000
over lead [pulse/mm]	-	480	1920	480	-	480	1920	480	-	-
positive to negative limit[mm]	-	66.206	130.886	109.962	-	66.979	130.729	108.875	-	-
over angle [pulse/deg]	1200	-	-	-	1200	-	-	-	700	700
positive to negative limit[degree]	25.0	-	-	-	25.0	-	-	-	30.0	30.0

Table 1 이족보행로봇의 기구적 사양

- DC Servo Motor
- Limit Sensor

로 구성되며, 시스템의 전체 블럭도는 Fig.4에 나타나 있다.

이상으로 전체 시스템이 구성되고, 각각의 기구적인 사양은 표 1에 나타나 있다.

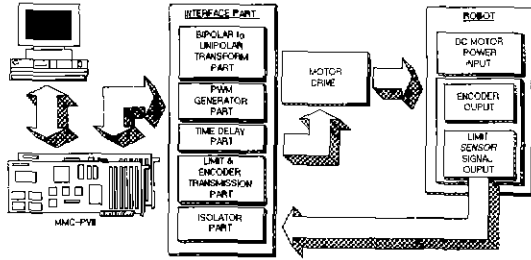


Fig. 4 전체 블럭도

4.2 구동실험



Pic.2 선 자세의 앞모습

Pic.3 선 자세의 옆모습



Pic.4 앉은 자세의 앞모습

Pic.5 앉은 자세의 옆모습

본 이족 보행로봇의 개발은 실험적인 방법으로 행하여 졌다. 우선 사람의 보행에서 관절들의 변화를 보기 위하여 각도센서가 부착된 기구를 사람의 다리에 부착, 관절들의 각도변화를 실험적으로 얻어 내어 이를 응용하여 이족 보행로봇을 구동시켜 보았다. 제자리에서 앉았다가 일어서는 동작은 두 다리의 기준점과 동작의 일치성을 보기 위하여 실행하였고 그 동작을 Pic.2, Pic.3, Pic.4, Pic.5에 나타내었다.

5. 결론

본 연구에서는 기존의 개발된 이족 보행로봇의 토크와 안정성의 한계점을 극복하기 위하여 고 강성, 높은 토크 변화율을 갖는 불나사를 이용하는 4절 링크 구조의 관절 구동기를 채용한 인체형 10자유도 이족 자율보행로봇을 개발하였다. 실 시스템의 보행을 목적으로 하는 메카니즘 설계와 실험적 연구방법으로 행하였고, 제어시스템을 직접 제작하였다. 인간 보행시 연속적으로 움직이는 각 관절들의 변화와 각 관절들의 각 변화 데이터를 파악하고, 이를 응용하여 로봇이 안정되게 보행할 수 있는 시간간격과 로봇의 안정성을 고려하여 보폭을 최대한 줄여 보행실험을 수행하였다. 이족 보행로봇에 채용한 4절 링크 구조의 관절 구동기는 연구결과 소용량의 구동기를 이용한 것에 비하여 민중할 만한 토크와 강성을 보여주었다.

이족 보행로봇은 최첨단 기술이 어우러진 복합적 시스템이다. 본 연구와 개발의 결과로 불나사를 이용한 이족 보행로봇 및 다족 보행로봇의 구동기 설계기술 및 제어 기술을 확보할 수 있었다.

향후, 안정성을 고려한 많은 보행 알고리즘의 개발과 인간과 같은 보행속도를 내는 기구학적 설계를 수행하고, 이를 통하여 계단과 같은 인간생활환경에서 작업할 수 있도록 많은 보행실험을 수행할 것이다. 이때 발견되는 여러 문제점들을 개선하여 보다 향상된 이족 보행로봇 시스템을 개발하고자 한다.

참고문헌

1. A. Takamishi, M. Ishida, Y. Yamazaki, I. Kato, "The Realization of Dynamic Walking by The Biped Walking Robot WL-10RD," Journal of the Robotics Society of Japan, vol. 3, no 4, pp 325-336, 1985
2. Yuan F. Zheng, "Acceleration Compensation for Biped Robots to Reject External Disturbance," IEEE Trans. Sys Man and Cyber, pp. 74-84, 1989.
3. Sun-Ho Lim and Jin-Geol Kim, "Biped Locomotion with Mechanical Compliance," (In Korean) Korea Robotics and Automation Workshop Conference, pp 21-25, 1992.
4. 김창부, 조현식, "이족보행로봇의 궤적의 최적화 계획에 관한 연구," 한국정밀공학회지 제 15권 제 3호 (1998년 3월), pp 157-167, 1998
5. J. Yamaguchi, D. Nishino, A. Takamishi, "Realization of Dynamic Biped Walking Varying Joint Stiffness Using Antagonistic Driven Joints," International Conference on Robotics & Automation Proc. of IEEE, pp. 2022-2029. 1998.