공학석사 학위논문

인체형 이족 보행로봇의 개발

Development of a Human-Sized Biped Walking Robot

지도교수 최 형 식

2001년 2월

한국해양대학교 대학원

기 계 공 학 과

박 용 헌

Development of a Human-Sized Biped Walking Robot

Yong-Heon Park

Department of Mechanical Engineering
Graduate School, Korea Maritime University

ABSTRACT

In this thesis, I present research results on a human-sized biped walking robot(BWR). The BWR was developed to walk autonomously such that it is actuated by small torque motors and is boarded with DC battery and controllers. The BWR is driven by a new joint actuator based on the ball screw which has high strength and high gear ratio. Using a small DC motor. The joint actuator is composed of 4-link bar actuated by the ball screw. The robot overcomes the limit of the driving torque of conventional BWRs. Each leg of the robot composes of three pitch joints and one roll joint. In all, a 10 degree-of-freedom robot with two balancing joints was developed. The motor drive and data interface system is developed. To develop BWR, I performed an analysis on the kinematics and dynamics of the BWR. In the performance test, the BWR performed motions of sitting-up and sitting-down. Through a set of experiments, we could find capability of high performance in biped-walking.

사 용 기 호

d_1	발목관절의 볼나사의 미끄럼변위
d_2	무릎관절의 볼나사의 미끄럼변위
d_3	힙관절의 볼나사의 미끄럼변위
q_1	발목관절의 회전각
q_2	무릎관절의 회전각
q_3	힙관절의 회전각
ϕ_1	발목관절 4절링크의 회전각에서 볼나사 미끄럼 변위까지의 수직거리
ϕ_2	무릎관절 4절링크의 회전각에서 볼나사 미끄럼 변위까지의 수직거리
ϕ_3	힙관절 4절링크의 회전각에서 볼나사 미끄럼 변위까지의 수직거리
a_2, a_3, a_4	발목관절 4절링크의 링크길이
b_2, b_3, b_4	무릎관절 4절링크의 링크길이
c_2, c_3, c_4	힙관절 4절링크의 링크길이
l_1	발목에서 무릎까지의 길이
l_{c1}	발목 좌표계(O_1)에서 l_1 상에 위치하는 무게중심까지 거리
l_2	무릎에서 힙까지의 길이
l_{c2}	무릎 좌표계(O_2)에서 l_2상에 위치하는 무게중심까지 거리
l_{c3}	힙 좌표계(O_3)에서 상단 방향으로의 무게중심까지 거리
D, H	관절행렬($R^{3\times3}$)

C, K	**원심력과 코리올리력을 포함하는 항**($R^{3\times3}$)
h	**중력 항**

목 차

Abstract
사용기호
표목차
그림목차

Ⅰ. 서론 1

Ⅱ. 관절구동기의 동역학 해석 4
2.1 발목관절의 동역학 방정식 6
2.2 무릎관절의 동역학 방정식 10
2.3 힙관절의 동역학 방정식 13

Ⅲ. 다리의 동역학 모델링 16
3.1 회전관절 공간상에서의 다리의 운동방정식 17
3.2 미끄럼관절 공간상에서의 다리의 운동방정식 19
3.3 10자유도 이족 보행로봇의 구성 21

Ⅳ. 제어부 23
4.1 제어기 24
4.2 인터페이스 장치 설계·제작 27
4.2.1 변환기 설계 29
4.2.2 PWM 발생기 설계 29
4.2.3 Dead Time 발생기 설계 30
4.2.4 센서신호 전달부 설계 31
4.2.5 전원분리부 설계 32
4.3 서보모터 구동부 설계 33

Ⅴ. 보행실험 및 고찰 36

Ⅵ. 결론 50

참고문헌

표 목 차

Table 4.1 Specification of controller
Table 4.2 Specification of DC servo motor
Table 5.1 A step of walking position

그 림 목 차

Fig. 2.1 The ball screw system
Fig. 2.2 Kinematics model of ankle joint
Fig. 2.3 Kinematics model of thigh joint
Fig. 2.4 Kinematics model of hip joint
Fig. 3.1 Kinematics model of support leg
Fig. 3.2 The 10D.O.F model of biped walking robot
Fig. 4.1 Block diagram of the total system
Fig. 4.2 Internal control loop
Fig. 4.3 Internal block diagram of MMC controller
Fig. 4.4 Internal DSP loop
Fig. 4.5 Interface part
Fig. 4.6 Transformation of bipolar to unipolar
Fig. 4.7 PWM generator
Fig. 5.1 The construction of motion capture system
Fig. 5.2 Data acquisition process

Pic. 2.1 The 10D.O.F biped walking robot
Pic. 4.1 MMC board
Pic. 4.2 MEI board
Pic. 4.3 Interface part
Pic. 4.4 Transformation of sensor signal
Pic. 4.5 Motor drive
Pic. 5.1 The construction of motion capture system
Pic. 5.2 The front view of standing position

Pic. 5.3 The side view of standing position
Pic. 5.4 The front view of bending position
Pic. 5.5 The side view of bending position
Pic. 5.6 The front view of step 0
Pic. 5.7 The side view of step 0
Pic. 5.8 The front view of step 1
Pic. 5.9 The side view of step 1
Pic. 5.10 The front view of step 2
Pic. 5.11 The side view of step 2
Pic. 5.12 The front view of step 3
Pic. 5.13 The side view of step 3
Pic. 5.14 The front view of step 4
Pic. 5.15 The side view of step 4
Pic. 5.16 The front view of step 5
Pic. 5.17 The side view of step 5
Pic. 5.18 The front view of step 6
Pic. 5.19 The side view of step 6
Pic. 5.20 The front view of step 7
Pic. 5.21 The side view of step 7
Pic. 5.22 The front view of step 8
Pic. 5.23 The side view of step 8
Pic. 5.24 The front view of step 9
Pic. 5.25 The side view of step 9
Pic. 5.26 The front view of step 10
Pic. 5.27 The side view of step 10

Ⅰ. 서 론

과거부터 로봇에 대한 연구와 개발은 계속 되어 왔고, 그 관심사가 최근에는 더욱 고조되고 있다. 과거에는 다관절 로봇이나 스칼라 로봇 같은 산업용 로봇에 대한 연구와 개발이 주를 이루었고, 이러한 로봇들은 위험하고 더럽거나 반복적이고 단순한 작업등에서 인간을 대신하여 한정된 작업영역에서 사용되어 왔지만, 오늘날의 로봇은 반도체 생산 공정과 같은 고도의 정밀도를 요구하거나 원자로내의 작업과 같은 극한 상황에서 사용되고 있을 뿐 아니라, 점차 적용 분야가 확장되어 농업, 수산업 및 사무실, 병원, 건설 현장에서부터 일상적인 생활환경으로 까지 옮겨지고 있다.

이러한 변화로 인간 생활환경에서 작업을 수행할 수 있는 로봇에 대한 연구가 수행되고있다. 그 대표적인 예가 바퀴 달린 Mobile robot과 다리가 있는 보행로봇에 대한 연구들이다. 바퀴 달린 Mobile robot은 다리가 있는 로봇에 비하여 제작 및 제어가 쉽고 에너지 효율은 높지만, 작업장의 면이 굴곡이 지고 요철이 있거나 계단이 있는 경우에는 이동이 용이하지 못하다. 대부분의 인간 생활환경은 인간 중심으로 만들어져서 계단이나 요철, 장애물 등이 존재하기 때문에 Mobile robot는 많은 제약을 받게 되지만, 인간과 유사한 구조를 갖는 이족 보행로봇은 대부분의 인간 생활환경에서 어려움 없이 작업을 수행할 수가 있어서 향후 인간작업 중의 많은 부분을 대행할 것이라는 예측과 함께 이에 대한 연구가 심도 있게 수행되어 왔다.

1960년대 후반부터 초기 이족 보행로봇에 관한 모델링이 제안된 이후 이족 보행로봇에 대한 많은 연구가 수행되었다. 이들은 연구 시기별 단계에 따라 크게 이족 보행로봇의 모델링과 제어, 그리고 걸음새나 몸체추진궤적을 포함한 제어로 나뉠 수 있다. 또한 연구 방법에 따라 이족 보행로봇의 걸음새나 몸체의 모델링 및 제어와 같은 이론적 연구와 실 시스템의 보행을 목적으로 하는 Mechanism설계와 실험적 연구로 분류할 수 있다.

초기 형태의 이론적 연구로서 이족 보행로봇의 모델링과 제어는 로봇의 외형에 따라 다리부만 고려한 연구와 다리부와 균형관절을 포함한 보다 복잡한 형태의 연구로 분류할 수가 있다. 전자의 경우로 동적 보행 시에 로봇의 걸음새 동작의 특성을 파악하고 이를 제어하는 연구[1][2], 3자유도 이족 보행로봇의 토크를 줄이기 위하여 경로계획을 이용한 제어[3], 5자유도의 이족 보행로봇의 운동방정식을 Direct nonlinear decoupling 방법에 의해 선형화 시켜 거동을 제어하는 연구[4], 토크센서를 이용하여 9

자유도의 로봇의 보행 제어[5], 보행동작의 모델링과 선형화 제어로 인한 상태공간의 안정도 해석[6], 5자유도 로봇의 모델링과 슬라이딩모드 제어를 통한 보행궤적 추적제어에 관한 연구들이 수행되었다[7].

다양한 환경 하에서 보행하기 위해서는 이족 보행로봇은 반드시 걸음주기나 보폭, 방향전환 등과 같은 걸음새를 변경할 수 있어야 한다. 그러나 하체의 다리부로 만 구성된 이족 보행로봇은 그렇지 않은 이족 보행로봇에 비하여 걸음새 변경능력이 미비하거나 훨씬 복잡한 알고리즘을 필요로 하며, 보행 전 균형점 궤적이나 균형운동을 검증 또는 결정하기 어려운 단점이 있다. 이를 해결하기 위하여 하체의 다리부분 만으로 구성된 초기형태의 로봇에 대한 연구를 바탕으로 보다 발전적으로 시스템의 안정도 보상을 위한 상부에 균형관절을 갖는 형태의 이족 보행로봇에 대한 연구를 수행하였다[9]. 구동각의 동 특성과 중력가속도에 대한 보상의 형태로 고려되어 온 이족 보행로봇의 균형관절은 그 개념이 소개된 이후 직진운동관절(Prismatic joint)[10][11][12]과 회전운동관절(Revolute joint)[9][13][14]의 두 가지 형태가 병존해 왔다.

1990년대 후반의 연구들은 이족 보행 걸음새나 로봇의 몸체 추진 궤적에도 관심을 보여왔다[15][16]. 이들 연구들은 전형적으로 역동력학(Inverse dynamics)연산에 의한 토크제어를 기본으로 하거나[28] 신경회로 알고리즘을 이용하여 걸음새를 구현하였다[17][18]. 이외에도 외란 관측기[19], H^{∞}제어기 등을 이용하여 강인한 제어를 구현하거나[20], 균형을 학습에 의해 개선시키는 연구[21], 모의실험을 수행하여 기존의 연구가 갖고 있는 제약을 극복하고자 하는 연구도 많이 수행되었다. 그러나 고자유도 시스템의 운동방정식의 복잡성으로 수학적 모델의 정립이 어렵고 이로 인하여 다양한 걸음새를 구현하기에는 제한적이었다. 또한, 이족 보행을 수행하는 데 있어서 최적의 에너지 소모를 도모하기 위한 연구도 병행되었으나[22], 이 역시 시스템의 안정도 또는 균형화를 포함하고 전체 시스템을 표현하는 수학적 모델을 도출하지 못한 한계성을 보여주었다. 이러한 기존 연구들의 한계점을 극복하고 보다 다양한 걸음새를 안정되게 구현하고 적절한 제어방법의 모색을 위해서는 이족 보행로봇의 안정도가 포함된 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 제어 시스템 구성의 두 방법이 고려되어야 한다. 구동기에 대한 초기 연구로 유압시스템을 사용하여 다리를 구동하는 연구가 있었으나, 유압은 무거운 중량, 큰 부피 외에

도 유지나 관리가 어려워 거의 대부분 감속기를 이용한 모터를 직접관절에 부착하는 구조로 되어있다. 하지만, 이 방법은 구동모터의 구동토크 한계와 감속기 강성의 한계로 구동 토크 변화율의 한계 및 로봇의 크기에 제한을 둘 수밖에 없는 구조적 한계점을 가지고 있다[23]. 이를 해결하기 위하여 스프링 메커니즘을 이용하여 구동기의 토크를 높이는 연구[24]가 수행되었지만 여전히 만족할 만한 강성을 얻지 못하고 있다. 따라서 규모에 있어서 소형이며 고강성을 가지며 높은 기어비로 고토크를 구현할 수 있는 구동기의 개발 없이는 이족 보행로봇의 원활한 보행은 한계가 있고, 따라서 이족 보행로봇의 개발은 그 의미를 잃게된다.

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 10자유도 이족 보행로봇 개발에 대한 연구결과를 나타내었다. 개발된 로봇은 각 다리가 2자유도의 발목과 무릎 및 힙 관절로 구성되고, 상체는 2자유도의 균형관절을 갖는 기구학적 구조를 갖는다.

DC 서보모터를 채택한 볼나사를 구동원으로 하고, 자율이동을 목표로 모터드라이브와 인터페이스 부분은 직접 제작하였다. 다리의 운동과 보행실험을 통하여 보다 발전된 형태의 이족 보행로봇 개발의 가능성을 확인하는데 중점을 두었다.

Ⅱ. 관절구동기의 동역학 해석

이족 보행 로봇은 인간과 닮은 보행구조를 가지고 있어서 바퀴형태의 이동체가 할 수 없는 계단을 오르거나 턱을 넘는 작업을 수행할 수 있다. 대부분의 이족 보행로봇은 회전관절의 기구학적 구조로 되어있고, 동역학적 해석도 회전공간 상에서 이루어진다[25][26]. 이들의 각 관절은 모터로 구동하는 구조로 되어있고 보행 시에는 회전 관절들로 구성된 한 다리로 자체 하중과 상부의 하중을 지탱해야 하므로 로봇의 크기가 커질수록 관절에 작용하는 토크가 커진다. 그리고 로봇의 보행 시에 안정성을 유지하기 위해서는 여러 가지 제약조건이 존재하여서 이를 만족시키기 위해서는 큰 토크의 변화율이 요구된다. 또한, 이족 보행로봇은 이동시스템이므로 자체에 동력원을 탑재한다. 이러한 동력원과 상체 및 다리 자체의 하중은 구동부하로 작용한다. 일반적으로 보행로봇을 구동하기 위하여 감속기를 채용한 모터를 직접 회전 관절에 부착하는 구조로 많은 연구를 하였다. 하지만 이 방법은 구동모터의 구동토크 한계와 감속기의 강성의 한계로 구동 토크 변화율의 한계 및 로봇의 크기에 제한을 둘 수밖에 없는 구조적 한계점을 가지고 있다[23][27].

본 논문에서는 위와 같은 한계점을 극복하기 위하여 고강성을 가지며 높은 기어비를 갖는 볼나사를 사용하는 구조로 새롭게 제안된 관절구동기[28][29]를 적용하였다. 적용된 방법은 4절링크 구조에 볼나사를 채용하는 방법으로 회전링크의 한 변에 볼나사를 사용하여 직선운동으로 대체한다. 직선운동은 서로 연결된 다른 링크의 회전각을 변환시키고, 궁극적으로 로봇 다리의 회전축을 구동한다. 적용된 볼나사 시스템은 Fig. 2.1과 같다.

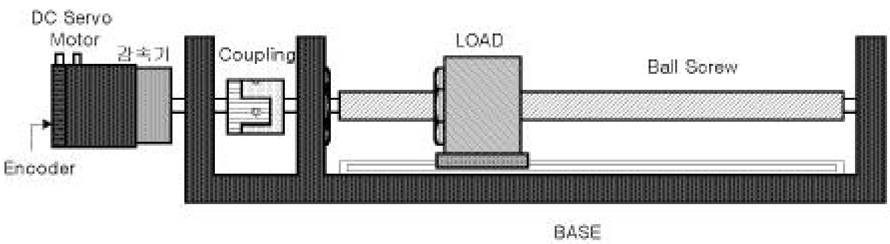
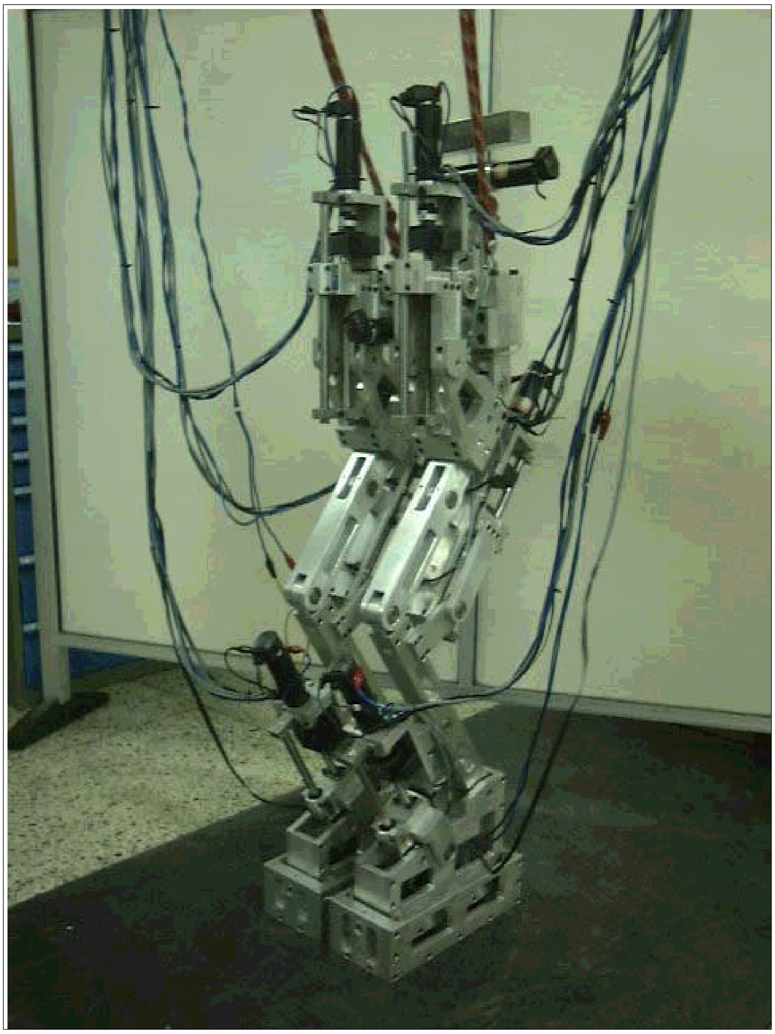


Fig. 2.1 The ball screw system

이족 보행로봇은 각 다리가 Pic. 2.1에서 보는바와 같이 기본적으로 2자유도의 발목 관절과 무릎, 힙관절로 구성되어 있고, 상체의 2자유도 균형관절을 포함하여 전체적으로 10자유도의 기구학적 구조를 갖는다.



Pic. 2.1 The 10 D.O.F biped walking robot

다리부분에 적용된 관절구동기는 4절링크 구조로서 각 다리의 발목, 무릎, 힙관절에 적용이 되었다.

본 논문에서는 먼저 Euler-Lagrange 방정식을 이용하여 회전 관절 공간에서 이족 보행로봇의 동역학 방정식을 유도한 후, 사절링크 기구 구동을 위한 볼나사의 미끄럼관절 공간에서의 운동방정식으로 변환한다. 이때, 제어입력의 형태도 관절구동을 위한 토크를 볼나사 구동의 힘의 입력으로 변환한다.

2.1 발목관절의 동역학 방정식

발목의 기구학적 구조는 Fig. 2.2에서 보는바와 같이 4절링크를 이용하여 직선운동을 회전운동으로 변환하는 구조를 가지고있다. 여기서 a_3는 발목관절과 무릎관절을 연결하는 종아리에 해당되고, a_4는 발에 해당된다. 운동 형태는 4절링크에서 d_1에 해당하는 볼나사가 미끄럼 운동을 하게 되면 발목관절에 해당하는 회전각 q_1이 회전하는 구조이다. 볼나사의 변위를 나타내는 d_1과 회전각 q_1의 관계는 다음과 같이 유도된다.

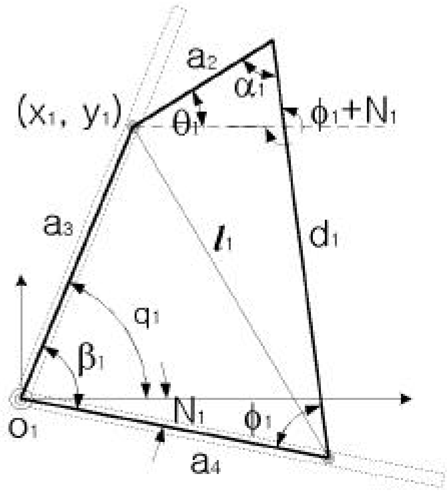


Fig. 2.2 Kinematics model of the ankle joint

Fig. 2.2에서 l_1을 이용한 양쪽의 삼각형에 코사인법칙을 적용하면

$$l_1 = a_2^2 + d_1^2 - 2a_2 d_1 \cos\alpha_1$$
$$= a_3^2 + a_4^2 - 2a_3 a_4 \cos\beta_1$$

$$d_1 = \frac{C_1 + [C_1^2 + 4(A_1 + B_1 \cos\beta_1)]^{0.5}}{2} \qquad (2.1)$$

여기서

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

링크길이 a_2, a_3, a_4와 링크각 α_1, N_1은 고정된 값들이다.

회전각 q_1과 직선거리 d_1과의 관계는 다음의 식으로 표현된다.

$$q_1 = \beta_1 - N_1 \qquad (2.2)$$

식 (2.1)의 미끄럼 변위를 시간에 관해 미분하면 다음과 같이 속도 및 가속도를 구할 수 있다.

$$\dot{d}_1 = -[C_1^2 + 4(A_1 + B_1 \cos\beta_1)]^{-0.5} B_1 \sin\beta_1 \dot{\beta}_1 \qquad (2.3)$$

$$\ddot{d}_1 = -2[C_1^2 + 4(A_1 + B_1 \cos\beta_1)]^{-1.5} B_1^2 \sin^2\beta_1 \dot{\beta}_1^2$$
$$- [C_1^2 + 4(A_1 + B_1 \cos\beta_1)]^{-0.5} (B_1 \cos\beta_1 \dot{\beta}_1^2 \qquad (2.4)$$
$$+ B_1 \sin\beta_1 \ddot{\beta}_1)$$

식 (2.1), (2.2), (2.3) 및 (2.4)를 이용하여 q_1과 d_1의 속도 및 가속도 관계식을 구하면 다음과 같다.

$$\beta_1 = q_1 + N_1 = acos[\frac{d_1^2 - A_1 - C_1 d_1}{B_1}] \tag{2.5}$$

$$\dot{\beta}_1 = \dot{q}_1 = R_{11}\dot{d}_1 \tag{2.6}$$

$$\ddot{\beta}_1 = \ddot{q}_1 = R_{12}\dot{d}_1^2 + R_{13}\ddot{d}_1 \tag{2.7}$$

여기서

$$R_{11} = \frac{[C_1^2 + 4(A_1 + B_1\cos\beta_1)]^{0.5}}{B_1\sin\beta_1}$$

$$R_{12} = -2[C_1^2 + 4(A_1 + B_1\cos\beta_1)]^{-1}B_1\sin\beta_1 R_{11}^2 + \frac{\cos\beta_1}{\sin\beta_1}R_{11}^2$$

$$R_{13} = -\frac{[C_1^2 + 4(A_1 + B_1\cos\beta_1)]^{0.5}}{B_1\sin\beta_1}$$

Fig. 2.2에서 d_1과 a_4가 만나는 점에서 (x_1, y_1)을 표현하여 ϕ_1과 d_1의 관계를 유도하면

$$x_1 = d_1\cos(\phi_1 + N_1) + a_2\cos\theta_1 = a_4\cos N_1 - a_3\cos q_1 \tag{2.8}$$

$$y_1 = d_1\sin(\phi_1 + N_1) - a_2\sin\theta_1 = a_4\sin N_1 + a_3\sin q_1 \tag{2.9}$$

여기서

$\theta_1 = \pi - \phi_1 - (\alpha_1 + N_1)$ 이다.

식(2.8)의 좌변을 ϕ_1에 대해 정리하면

$$
\begin{aligned}
& d_1(\cos\phi_1\cos N_1 - \sin\phi_1\sin N_1) \\
+ \quad & a_2[\cos(\pi - \phi_1)\cos(\alpha_1 + N_1) + \sin(\pi - \phi_1)\sin(\alpha_1 + N_1)] \\
= \quad & [d_1\cos N_1 - a_2\cos(\alpha_1 + N_1)]\cos\phi_1 \\
- \quad & [d_1\sin N_1 - a_2\sin(\alpha_1 + N_1)]\sin\phi_1
\end{aligned}
$$

여기서

$\cos(\pi - \phi_1) = -\cos\phi_1$

$\sin(\pi - \phi_1) = \sin\phi_1$ **이고**,

$A_1 = d_1\cos N_1 - a_2\cos(\alpha_1 + N_1)$

$B_1 = d_1\sin N_1 - a_2\sin(\alpha_1 + N_1)$ **으로 정의하면**,

$$A_1\cos\phi_1 - B_1\sin\phi_1 = x_1 \tag{2.10}$$

식(2.9)**의 좌변을** ϕ_1**에 대해 정리하면**

$$
\begin{aligned}
& d_1(\sin\phi_1\cos N_1 + \cos\phi_1\sin N_1) \\
- \quad & a_2[\sin(\pi - \phi_1)\cos(\alpha_1 + N_1) - \cos(\pi - \phi_1)\sin(\alpha_1 + N_1)] \\
= \quad & [d_1\cos N_1 - a_2\cos(\alpha_1 + N_1)]\sin\phi_1 \\
+ \quad & [d_1\sin N_1 - a_2\sin(\alpha_1 + N_1)]\cos\phi_1
\end{aligned}
$$

이고, **식** (2.10)**과 같이 정리하면**

$$B_1\cos\phi_1 + A_1\sin\phi_1 = y_1 \tag{2.11}$$

식 (2.10)**과 식** (2.11)**에서** ϕ_1**을 구하면**

$$\phi_1 = acos[\frac{A_1 x_1 + B_1 y_1}{A_1^2 + B_1^2}] \tag{2.12}$$

ϕ_1을 이용하면 볼나사와 원점 O_1과의 수직거리를 구하여 원점에 작용하는 토크를 구할 수 있다.

2.2 무릎관절의 동역학 방정식

무릎관절 부분에 적용된 4절 링크는 Fig. 2.3에 나타난 바와 같이 발목관절의 구조와 유사하다. 그림에서 b_3는 무릎관절과 힙관절을 연결하는 허벅지 부분이며 볼나사 구동의 직선이동변위는 d_2이다. 무릎관절의 볼나사에 해당하는 직선이동변위 d_2와 회전각 β_2의 관계는 발목관절과 유사하고 그 결과식은 다음과 같다.

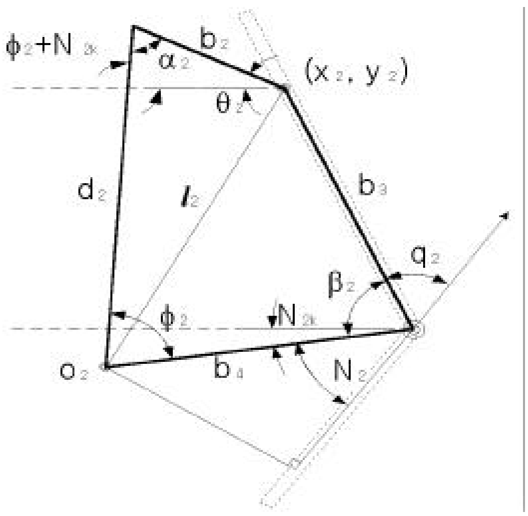


Fig. 2.3 Kinematics model of the thigh joint

$$d_2 = \frac{C_2 + [C_2^2 + 4(A_2 + B_2\cos\beta_2)]^{0.5}}{2} \qquad (2.13)$$

여기서

$$A_2 = b_3^2 + b_4^2 - b_2^2$$

$$B_2 = -2b_3b_4$$

$$C_2 = 2b_2\cos\alpha_2$$ 이고,

링크길이 b_2, b_3, b_4와 링크각 α_2, N_2, N_{2k}은 고정된 값들이다.

무릎관절에서 우리가 원하는 직선이동거리 d_2와 회전각 q_2와의 관계는

$$q_2 = \pi - \beta_2 - N_2 \qquad (2.14)$$

로 표현된다.

식 (2.13)의 직선이동거리 d_2와 회전각 q_2와의 관계식을 시간에 대해 미분하여 정리하면, 속도와 가속도를 구할 수 있다.

$$\dot{d}_2 = -[C_2^2 + 4(A_2 + B_2\cos\beta_2)]^{-0.5}B_2\sin\beta_2\dot{\beta}_2 \qquad (2.15)$$

$$\begin{aligned}\ddot{d}_2 = & -2[C_2^2 + 4(A_2 + B_2\cos\beta_2)]^{-1.5}B_2^2\sin^2\beta_2\dot{\beta}_2^2 \\ & -[C_2^2 + 4(A_2 + B_2\cos\beta_2)]^{-0.5}(B_2\cos\beta_2\dot{\beta}_2^2 \\ & + B_2\sin\beta_2\ddot{\beta}_2)\end{aligned} \qquad (2.16)$$

식 (2.13) (2.14), (2.15) 및 식(2.16)을 이용하여 q_2과 d_2의 속도 및 가속도 관계식을 구하면 다음과 같다.

$$\beta_2 = acos[\frac{d_2^2 - A_2 - C_2 d_2}{B_2}] \tag{2.17}$$

$$\dot{\beta}_2 = -\dot{q}_2 = R_{21}\dot{d}_2 \tag{2.18}$$

$$\ddot{\beta}_2 = -\ddot{q}_2 = -R_{22}\dot{d}_2^2 - R_{23}\ddot{d}_2 \tag{2.19}$$

여기서

$$R_{21} = \frac{[C_2^2 + 4(A_2 + B_2\cos\beta_2)]^{0.5}}{B_2\sin\beta_2}$$

$$R_{22} = -2[C_2^2 + 4(A_2 + B_2\cos\beta_2)]^{-1} B_2 \sin\beta_2 R_{21}^2 + \frac{\cos\beta_2}{\sin\beta_2} R_{21}^2$$

$$R_{23} = -\frac{[C_2^2 + 4(A_2 + B_2\cos\beta_2)]^{0.5}}{B_2\sin\beta_2}$$

ϕ_2**와** d_2**의 관계는**

$$\phi_2 = acos[\frac{A_2 x_2 + B_2 y_2}{A_2^2 + B_2^2}] \tag{2.20}$$

여기서

$A_2 = d_2 \cos N_{2k} - b_2 \cos(\alpha_2 + N_{2k})$

$B_2 = d_2 \sin N_{2k} - b_2 \sin(\alpha_2 + N_{2k})$ **이다**.

2.3 힙관절의 동역학 방정식

힙관절 부분에 해당하는 4절링크도 Fig. 2.4에 나타난 바와 같이 발목과 무릎에 적용된 관절과 유사한 구조를 가진다. Fig.4에서 c_2, c_3, c_4의 링크길이와 α_3, N_3, N_{31k}, N_{32k}의 링크각은 고정된 값들이다. 볼나사에 해당하는 직선이동거리는 d_3이고, 힙관절의 회전각 β_3와 d_3의 관계식은 다른 관절들과 유사하게 다음과 같이 유도된다.

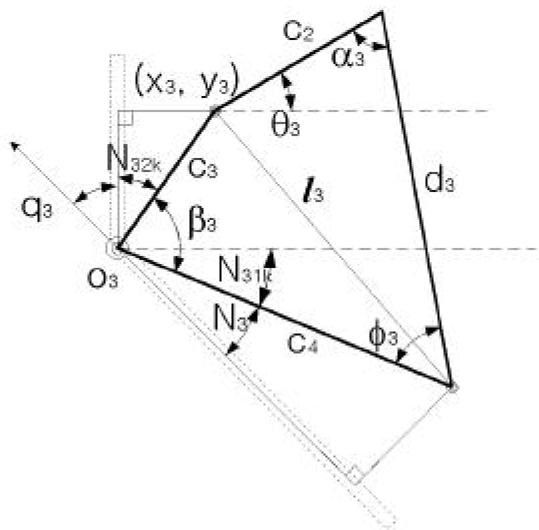


Fig. 2.4 Kinematics model of the hip joint

$$d_3 = \frac{C_3 + [C_3^2 + 4(A_3 + B_3 \cos \beta_3)]^{0.5}}{2} \qquad (2.21)$$

여기서

$A_3 = c_3^2 + c_4^2 - c_2^2$

$B_3 = -2c_3 c_4$

$C_3 = 2c_2 \cos \alpha_3$ 이고,

힙관절의 회전각 q_3와 d_3의 관계식은

$$\beta_3 = \pi - N_3 - N_{32k} - \beta_3 \tag{2.22}$$

으로 정리할 수 있다.

식 (2.21)을 시간에 대해 미분하면 다음과 같이 속도와 가속도가 정의된다.

$$\dot{d}_3 = -[C_3^2 + 4(A_3 + B_3 \cos\beta_3)]^{-0.5} B_3 \sin\beta_3 \dot{\beta}_3 \tag{2.23}$$

$$\begin{aligned}\ddot{d}_3 = & -2[C_3^2 + 4(A_3 + B_3 \cos\beta_3)]^{-1.5} B_3^2 \sin^2\beta_3 \dot{\beta}_3^2 \\ & -[C_3^2 + 4(A_3 + B_3 \cos\beta_3)]^{-0.5} (B_3 \cos\beta_3 \dot{\beta}_3^2 \\ & + B_3 \sin\beta_3 \ddot{\beta}_3)\end{aligned} \tag{2.24}$$

다른 관절의 식들과 유사하게 식 (2.21), (2.22), (2.23) 및 식 (2.24)를 이용하여 q_3와 d_3의 속도 및 가속도 관계식을 구하면 다음과 같다.

$$\beta_3 = acos\left(\frac{d_3^2 - A_3 - C_3 d_3}{B_3}\right) \tag{2.25}$$

$$\dot{\beta}_3 = \dot{q}_3 = R_{31} \dot{d}_3 \tag{2.26}$$

$$\ddot{\beta}_3 = \ddot{q}_3 = R_{32} \dot{d}_3^2 + R_{33} \ddot{d}_3 \tag{2.27}$$

여기서

$$R_{31} = \frac{[C_3^2 + 4(A_3 + B_3 \cos\beta_3)]^{0.5}}{B_3 \sin\beta_3}$$

$$R_{32} = -2[C_3^2 + 4(A_3 + B_3 \cos\beta_3)]^{-1} B_3 \sin\beta_3 R_{31}^2 + \frac{\cos\beta_3}{\sin\beta_3} R_{31}^2$$

$$R_{33} = -\frac{[C_3^2 + 4(A_3 + B_3 \cos\beta_3)]^{0.5}}{B_3 \sin\beta_3}$$

ϕ_3와 d_3의 관계는

$$\phi_3 = acos[\frac{A_3 x_3 + B_3 y_3}{A_3^2 + B_3^2}] \tag{2.28}$$

여기서

$A_3 = d_3 \cos N_{31k} - c_3 \cos(\alpha_3 + N_{31k})$

$B_3 = d_3 \sin N_{31k} - c_3 \sin(\alpha_3 + N_{31k})$ 이다.

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

Ⅲ. 다리의 동역학 모델링

이족 보행로봇을 구성하는 다리는 Fig. 3.1과 같이 기본적으로 발목, 무릎 및 힙의 회전관절로 구성되어 있고, 일반적으로 3자유도 산업용 스칼라 로봇 매니퓰레이터와 같은 연쇄적인 구조를 갖는다. 관절구동기의 직선운동에 의해 각 관절들은 회전운동을 하게 되며 궁극적으로 로봇을 구동한다. 여기에 Euler - Lagrange을 적용하여 운동방정식을 구하면 다음과 같다.

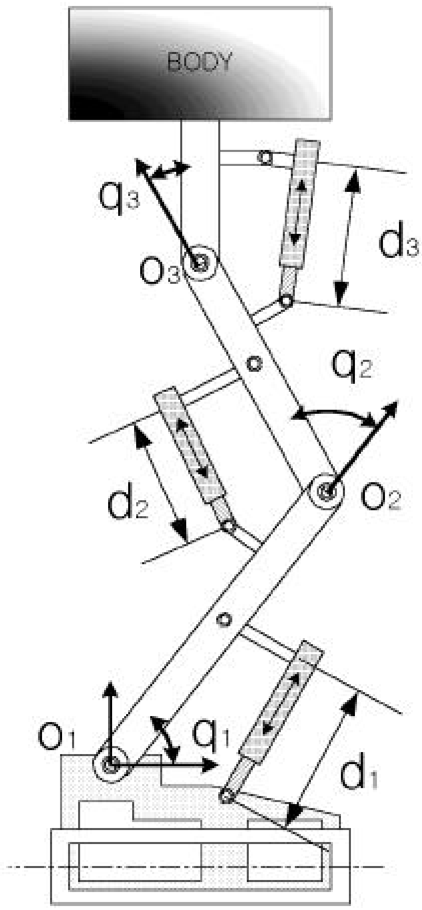


Fig. 3.1 Kinematics model of one leg

3.1 회전관절 공간상에서의 다리의 운동방정식

각 관절들의 회전관절 공간상에서 운동방정식은 다음과 같다.

$$D(q)\ddot{q} + C(q,\dot{q})\dot{q} + h(q) = \tau \tag{3.1}$$

여기서 $D(q) \in R^{3\times3}$는 관성행렬이고, $C(q,\dot{q}) \in R^{3\times3}$는 원심력과 코리올리력을 포함하는 항이며, $h(q)$는 각 관절에 가해지는 중력 항이다. 이들의 구성을 구체적으로 살펴보면 다음과 같다.

$$D = \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & D_{13} \\ D_{21} & D_{22} & D_{23} \\ D_{31} & D_{32} & D_{33} \end{bmatrix}$$

$$C = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} \end{bmatrix}$$

$$h = [h_1, h_2, h_3]^T$$

여기서

$$D_{11} = m_1 l_{c1}^2 + m_2(l_1^2 + l_{c2}^2 + 2l_1 l_{c2}\overline{C_2}) + m_3(l_1^2 + l_2^2 + l_{c3}^2 + 2l_1 l_2 \overline{C_2}$$
$$+ 2l_2 l_{c3}\overline{C_3} + 2l_1 l_{c3}\overline{C_{23}}) + I_1 + I_2 + I_3$$

$$D_{12} = D_{21} = m_2(l_{c2}^2 + l_1 l_{c2}\overline{C_2}) + m_3(l_2^2 + l_{c3}^2 + l_1 l_2\overline{C_2} + 2l_2 l_{c3}\overline{C_3}$$
$$+ l_1 l_{c3}\overline{C_{23}}) + I_2 + I_3$$

$$D_{13} = D_{31} = m_3(l_{c3}^2 + l_2 l_{c3}\overline{C_3} + l_1 l_{c3}\overline{C_{23}}) + I_3$$

$$D_{22} = m_2 l_{c2}^2 + m_3(l_2^2 + l_{c3}^2 + 2l_2 l_{c3}\overline{C_3}) + I_2 + I_3$$

$$D_{23} = D_{32} = m_3(l_{c3}^2 + l_2 l_{c3}\overline{C_3}) + I_3$$

$$D_{33} = m_3 l_{c3}^2 + I_3$$

편의상 $i, j = 3$에 대하여 $\overline{C_i} = \cos(q_i)$과 $\overline{C_{ij}} = \cos(q_i + q_j)$로 표현하였고, 사인함수에 대해서도, $i, j = 3$에 대하여 $\overline{S_i} = \sin(q_i)$ 과 $\overline{S_{ij}} = \sin(q_i + q_j)$로 표현한다.

식 (3.1)에서 원심력과 코리올리력을 포함하는 행렬 $C(q, \dot{q})$를 표현하기 위해서 Cristoffel 기호를 이용하여 정리하면 다음과 같다.

$$C_{121} = C_{211} = C_{221} = -m_2 l_1 l_{c2} \overline{S_2} - m_3 l_1 l_2 \overline{S_2} - m3 l_3 l_{c3} \overline{S_{23}}$$

$$C_{131} = C_{311} = -m_3 l_2 l_{c3} \overline{S_3} - m_3 l_1 l_{c3} \overline{S_{23}}$$

$$C_{231} = C_{321} = C_{331} = -m_3 l_1 l_{c3} \overline{S_{23}} - m3 l_2 l_{c3} \overline{S_3}$$

$$C_{112} = -C_{121}$$

$$C_{132} = C_{312} = C_{232} = C_{322} = C_{332} = -m3 l_2 l_{c3} \overline{S_3}$$

$$C_{113} = m_3 l_1 l_{c3} \overline{S_{23}} + m3 l_2 l_{c3} \overline{S_3}$$

$$C_{123} = C_{223} = m3 l_2 l_{c3} \overline{S_3}$$

위의 식들을 이용하면 $C(q, \dot{q})$의 각 요소는 다음과 같이 표현된다.

$$C_{11} = C_{121}\dot{q}_2 + C_{131}\dot{q}_3$$

$$C_{12} = C_{211}\dot{q}_1 + C_{221}\dot{q}_2 + C_{231}\dot{q}_3$$

$$C_{13} = C_{311}\dot{q}_1 + C_{321}\dot{q}_2 + C_{331}\dot{q}_3$$

$$C_{21} = C_{112}\dot{q}_1 + C_{132}\dot{q}_3$$

$$C_{22} = C_{232}\dot{q}_3$$

$$C_{23} = C_{312}\dot{q}_1 + C_{322}\dot{q}_2 + C_{332}\dot{q}_3$$

$$C_{31} = C_{113}\dot{q}_1 + C_{123}\dot{q}_2$$

$$C_{32} = C_{213}\dot{q}_1 + C_{223}\dot{q}_2$$

$$C_{13} = 0$$

중력 항 벡터 $h(q)$의 구성요소는 다음과 같다.

$$
\begin{aligned}
h_1 = \; & m_1 g l_{c1} + m_2 g l_1 + m_3 g l_1) \cos q_1 \\
& + (m_2 g l_{c2} + m_3 g l_2) \cos q_{12} + m_3 g l_{c3} \cos q_{123} \\
h_2 = \; & (m_2 g l_{c2} + m_3 g l_2) \cos q_{12} + m_3 g l_{c3} \cos q_{123} \\
h_3 = \; & m_3 g l_{c3} \cos q_{123}
\end{aligned}
$$

3.2 미끄럼관절 공간상에서의 다리의 운동방정식

앞 절에서 표현된 운동방정식은 관절각 q와 토크 τ의 관계를 정립한 식이다. 본 논문에 적용된 관절구동기는 직선운동에 의해 회전운동이 이루어지므로 볼나사의 직선운동 변위 d와 직선운동 방향의 구동력 F의 관계로 정립되어야한다. 따라서 3.1절에서 정립된 운동방정식에 2장에서 정의된 관절구동기 운동방정식을 적용하여 다시 정리하면 다음과 같다.

회전관절 공간상의 토크 τ와 직선운동 방향의 구동력 F의 관계식을 유도하기 위해 각 관절공간상의 점 O_1, O_2, O_3에서 각각의 볼나사의 미끄럼 방향에 수직인 법선을 그렸을 때, 이 법선 길이와 볼나사에 가해지는 구동력 F의 곱이 각 관절에서 발생하는 토크 τ가 된다.

우선, 발목관절에 작용하는 토크 τ_i와 4절링크의 구동원인 볼나사의 제어입력 F_i사이의 관계식을 유도한다. Fig. 5, 6 및 7에 표시된 바와 같이 4절 링크의 회전부분에 임의의 좌표 (x_i, y_i)를 이용하면 식 (2.12), (2.19), (2.27)의 식이 유도되고, 이를 일반화하면

$$
\phi_i = \operatorname{atan}\left(\frac{A_i x_i + B_i y_i}{A_i^2 + B_i^2} \right) \tag{3.2}
$$

발목관절에 걸리는 토크 τ_i 는 O_i에서 발생하므로, 볼나사의 직선운동 방향의 구동력 F_i과 관계식은 다음과 같다.

$$\tau_i = F_i \, l_4 \cos \phi_i \tag{3.3}$$

여기서 l_4는 발목에서 힙까지 a_4, b_4, c_4이다.

식 (3.1)에 식 (3.3)을 적용하여 다시 정리하면 다음과 같다.

$$H(d)\ddot{d} + K(d, \dot{d})\dot{d} + h(d) = LF \tag{3.4}$$

여기서

$$H(d) = D(d)R(d)$$

$$K(d, \dot{d}) = C(d, \dot{d})\dot{d} + H(d)R_d(d),$$

$$R(d) = \begin{bmatrix} R_{13} & 0 & 0 \\ 0 & -R_{23} & 0 \\ 0 & 0 & R_{32} \end{bmatrix}$$

$$R_d(d) = \begin{bmatrix} R_{12}\dot{d}_1^2 \\ -R_{22}\dot{d}_2^2 \\ R_{32}\dot{d}_3^2 \end{bmatrix}$$

$$F = [F_1 \; F_2 \; F_3]^T$$

$$L = \begin{bmatrix} a_4\cos\phi_1 & 0 & 0 \\ 0 & b_4\cos\phi_1 F_2 & 0 \\ 0 & 0 & c_4\cos\phi_3 \end{bmatrix}$$

식 (3.4)에서는 $H(d)$, $K(d, \dot{d})$ 및 $h(d)$는 식 (3.1)의 $D(q)$, $C(q, \dot{q})$ 및 $h(q)$의 관절각이 미끄럼 변위로 표현되었고, 관절공간의 입력 τ도 미끄럼 공간의 힘 F로 표현되었다.

3.3 10자유도 이족 보행로봇의 구성

개발된 이족 보행로봇은 Fig. 3.2와 같은 구조로 되어 있다. 그림에서 보는바와 같이 10자유도 이족 보행로봇은 4절링크 관절구동기가 적용된 각 다리의 3자유도와 발목의 Roll운동을 담당하는 각 다리의 1자유도, 상부의 2자유도 균형관절을 포함하여 전체 10 자유도로 구성되어 있다.

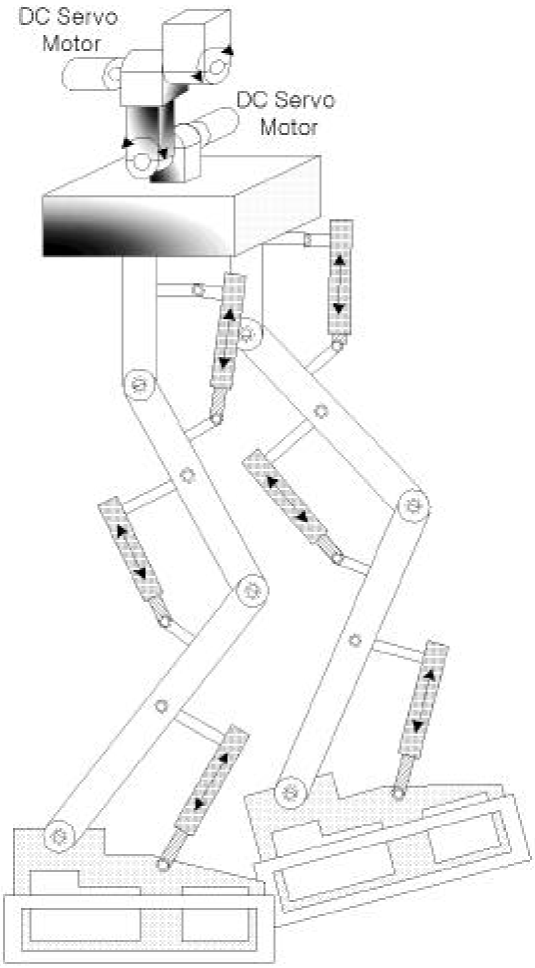


Fig. 3.2 The 10 D.O.F model of the biped walking robot

3.2절에서 4절링크 관절구동기가 적용된 3자유도 다리부분의 기구학적 해석 및 동역학 방정식을 유도하였고, 이 동역학 방정식은 각 다리에 동일하게 적용이 된다.

발목의 Roll운동에 적용된 관절은 높은 기어비의 감속기가 부착된 모터를 직접 연결한 타입으로, 신발과 같은 발 외피의 Roll운동을 담당하며, 발의 외피를 중심으로 보면 궁극적으로 다리부분의 좌우운동을 담당하게 된다. 상부의 균형관절은 그림에서와 같이 2자유도로 구성되어 있고, 이 부분에 적용된 모터도 감속기가 직접 부착된 타입이다. 전후의 Pitch운동을 하는 관절과 좌우의 Roll운동을 하는 관절로 구성되어 있고, 이는 각 다리의 움직임으로 인하여 발생하는 걸음새 구현 시 무게중심을 안정한 범위에 유지시키기 위한 부분으로 무거운 질량체가 부착되어 있다.

각 관절은 볼나사의 직선운동거리로 인해 회전각이 제한되므로 걸음새의 보폭도 이로 인해 제한된다. 따라서 볼나사 시스템의 너트부분이 움직일 수 있는 가능거리가 걸음새에 중요한 역할을 하였다.

Ⅳ. 제어부

본 연구를 통해 개발된 이족 보행로봇은 자율보행을 목적으로 하므로 구동모터는 소형 DC 서보모터를 채용하였다. 모터의 구동을 제어하기 위하여 상용 모션 제어기를 이용하였고, 로봇의 보행을 위한 상위 제어기로는 펜티엄Ⅲ PC를 사용하였다.

이족 보행로봇은 전체 10자유도로 구성되어 있다. 이들을 제어하기 위하여 삼성 MMC-PV8 보드와 MEI104/DSP 보드를 각각 한 대씩 사용하였다.

10자유도 관절들은 DC 서보모터로 부터 구동력이 제공된다. 1축 당 DC 서보모터 1대씩 채용되었으며, DC 서보모터들이 병렬적으로 구성되어 10자유도를 구동한다. 1축에 해당하는 구성도는 Fig. 4.1과 같고, 이들의 동시적인 제어는 모션제어기인 MMC와 MEI, 그리고 상위제어기인 PC에서 이루어진다.

Fig. 4.1에서 보는바와 같이 인터페이스 부분과 모터 드라이브 부분, Limit Sensor, Encoder Sensor등이 모터와 제어기 사이를 연결하며 이들의 자세한 구성을 살펴보면 다음과 같다.

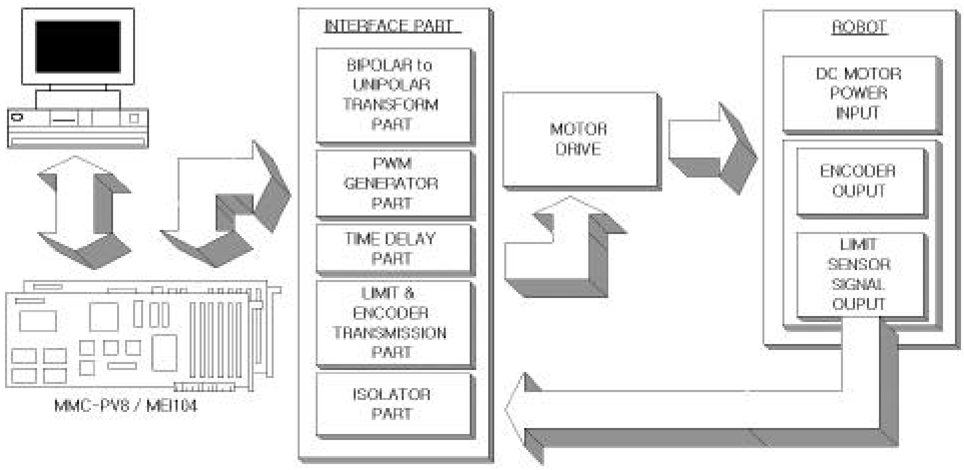
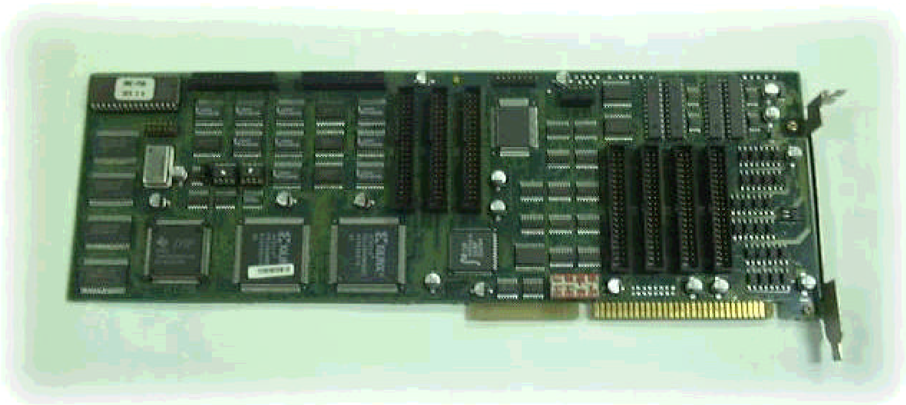


Fig. 4.1 Block diagram of the total system

4.1 제어기

상용화 되어있는 모터제어 전용 제어기들은 그 종류가 많다. 그 중 본 연구에서 선택한 제어기는 삼성 MMC-PV8 보드와 MEI 사에서 개발된 MEI-104 /DSP이고, Pic. 4.1과 Pic. 4.2는 이들을 보여주고 있다.



Pic. 4.1 MMC board

Pic. 4.2 MEI board

이들의 사양은 Table 1과 같으며 MMC 제어기는 8자유도의 다리부분을 제어하고, MEI 제어기는 균형관절의 2자유도를 제어한다.

Table 4.1 Specification of controller

항 목	MMC-PV8	MEI-104/DSP
제어 가능 축 수 (실제 사용 축 수)	8축(8축)	4축(2축)
CPU	TMS320C31	ADSP-2105
Sampling Rate	1 msec	0.83 msec
Analog 출력	±10V, 12bit 분해능	±10V, 12bit 분해능
동작범위	32bit	32bit
사용자 I/O	TTL Level 각 32점	TTL Level 각 20점
Limit Sensor 입력	24점	12점

두 제어기는 CPU의 차이로 인해 부분적으로 차이는 있으나 Table 1에서 보는 바와 같이 거의 유사한 사양을 가지고 있다.

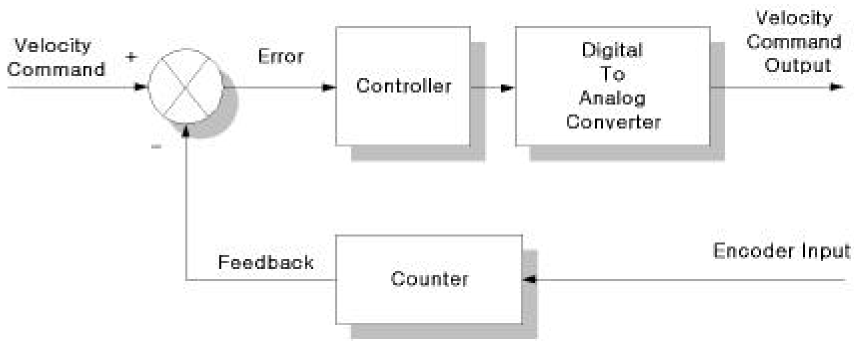


Fig. 4.2 Internal control loop

MMC와 MEI 제어기는 기본적으로 Proportional-Integral-Derivative-Feedforward(PIDF)제어 알고리즘을 내장하고 있으며, 제공되는 함수를 통해 파라미터를 맞추어 주면 된다. Fig. 4.2는 내부 제어 Loop의 블록 다이어그램이고, Fig. 4.3은 MMC 제어기의 내부 블록도 이고, MEI 제어기는 제어축의 차이만 있을 뿐 이와 유사하다. Fig. 4.4는 내부 처리 루틴을 나타내며 두 제어기가 동일하다.

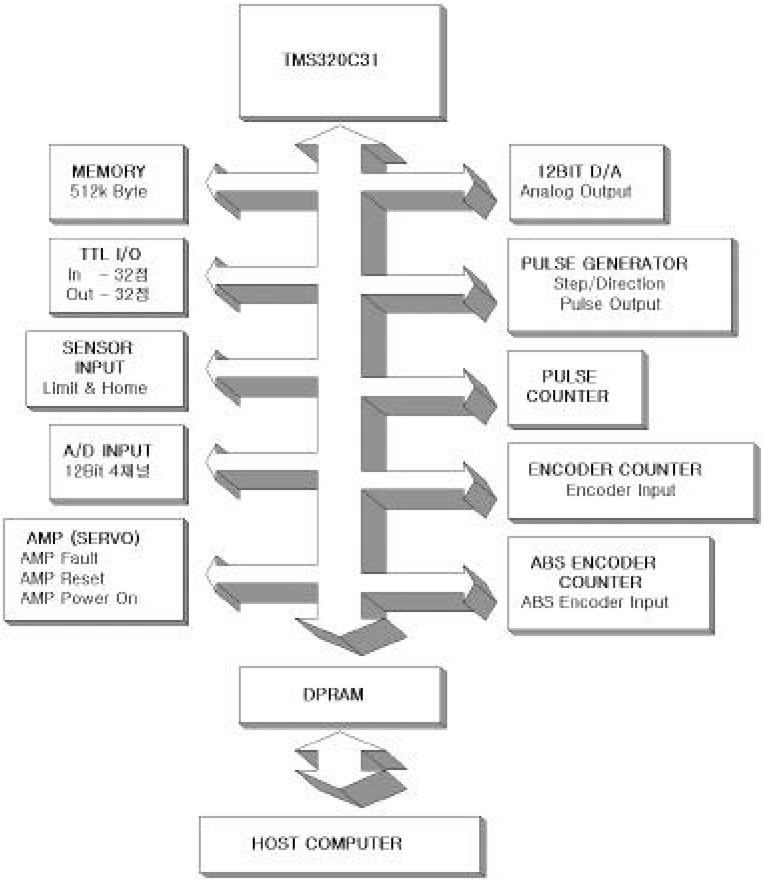


Fig. 4.3 Internal block diagram of MMC controller

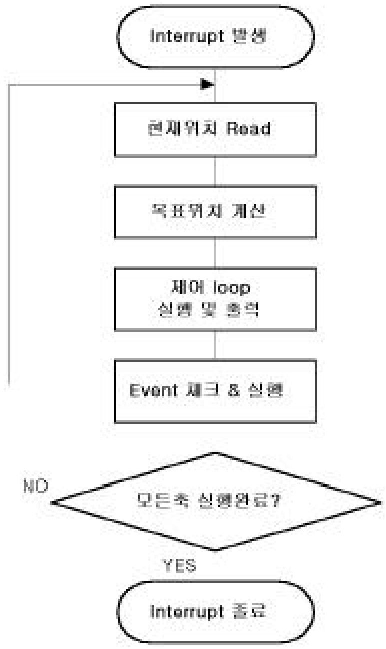
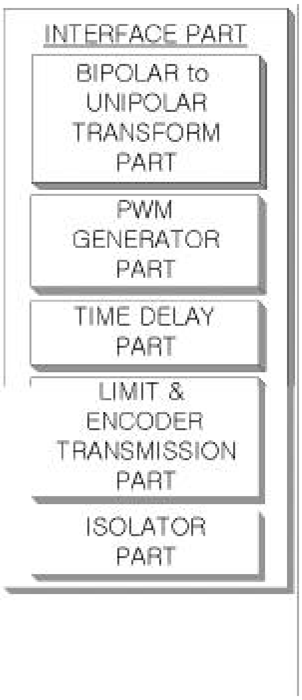


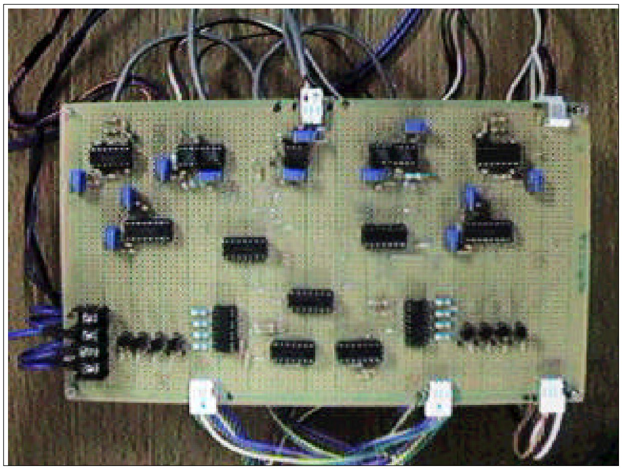
Fig. 4.4 Internal DSP loop

4.2 인터페이스 장치 설계·제작

상용화되어 있는 모션제어기는 주로 Closed Loop 제어방식으로 AC 서보모터의 위치/속도제어와 Open Loop 제어방식으로 Stepper 모터를 제어하도록 구성되어 있다. 이러한 모션제어기로 DC 서보모터를 제어하려면 제어기와 DC 서보모터 사이에 인터페이스 장치가 필요하고, Fig. 4.5와 같이 구성되어 있다.

DC 서보모터의 전원공급장치인 드라이브와 더불어 제어기와 드라이브를 연결하는 인터페이스 장치는 직접 제작하였고, 실제 사진은 Pic. 4.3과 같다. MMC 제어기의 8축과 MEI 제어기의 2축으로 제어하는 DC 서보모터는 병렬적인 구조로 구성되어 있다. 이러한 병렬적인 구조를 연결하는 인터페이스 부분은 보드 당 2축씩 5대가 필요하다.





Pic. 4.3 Interface part

4.2.1 변환기 설계

모션제어기에서는 AC 서보모터의 위치제어와 Stepper 모터를 제어하기 위해 듀티비가 50 : 50인 펄스발생기가 있고, AC 서보모터의 속도제어를 위해 -10 +10Volt의 아날로그 출력이 있다. 이들 중 DC 서보모터의 PWM 제어를 위해 아날로그 출력을 사용하였다. DC 모터의 전원공급장치인 드라이브는 바이폴라 출력인 -10 +10Volt의 출력을 사용하여 PWM 제어를 하는 방식과 유니폴라 출력인 0 +10Volt의 출력과 방향신호를 이용하는 방식이 있다. 일반적으로 후자가 효율이 높으므로 바이폴라 출력을 유니폴라 출력으로 변환하는 부분이 필요하다. 그 구성은 Fig. 4.6과 같고, OP Amp를 이용하였다.

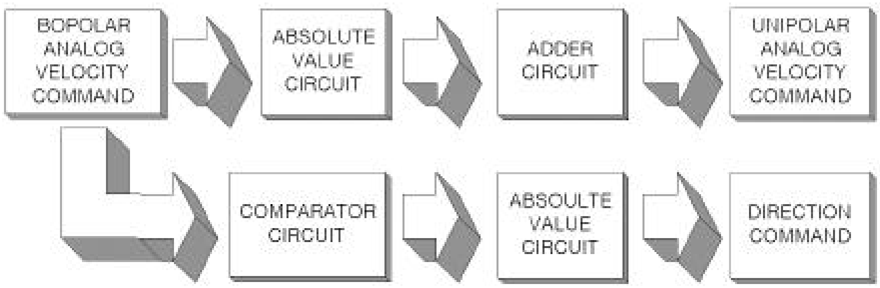


Fig. 4.6 Transformation of the bipolar to unipolar signal

4.2.2 PWM 발생기 설계

PWM(Pulse Width Modulation) 구동은 펄스의 폭을 변화시켜서 그의 평균전압으로 모터를 제어하는 방식이다. 대부분의 증폭소자들이 활성영역에서는 에너지 손실이 많이 발생한다. 따라서 이를 피하기 위해 차단영역과 포화영역만을 사용하여 스위칭하는 방식으로, 에너지 손실을 줄이기 위한 제어방식 중의 하나이다.

DC 모터는 대부분 PWM 신호로 속도지령을 주는 방식으로 제어를 한다.

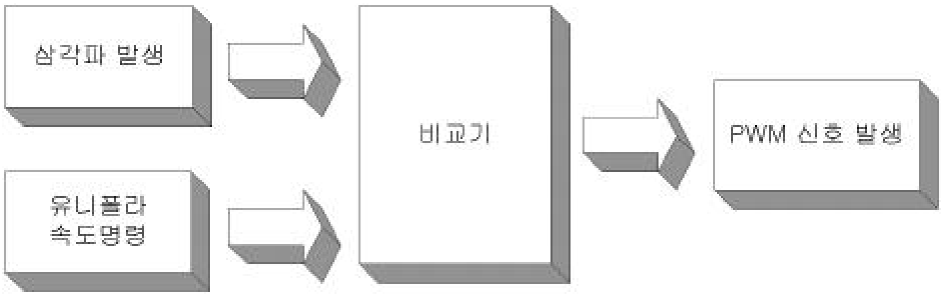


Fig. 4.7 PWM generator

PWM 신호의 주파수는 일반적으로 4kHz 이상이어야 효율이 높으나 본 시스템에서 사용한 방식은 OPAmp을 이용하여 삼각파를 발생하므로 저항과 콘덴서의 특성상 이 정도의 주파수를 발생하기는 어렵고 사용된 주파수는 약 300Hz 정도이다.

이 부분은 앞으로 개선을 요하는 부분으로 효율향상을 위해 PWM 신호의 상승/하강시간을 최소화하기 위한 회로부와 DC to DC Converter를 이용한 전원분리부가 설계·실험중이다.

4.2.3 Dead time 발생기 설계

DC 모터 제어에서는 기본적으로 구동 및 정지시에 속도의 가/감속, 정/역 전환시의 Dead time control과 전원분리가 필수적이다. Dead time control부분은 Monostable multivibrator를 이용하여 가변저항으로 Dead time을 결정할 수 있게 제작되었는데 고부하를 받고 있는 DC 모터의 제어에는 반드시 있어야 할 부분이다.

제어기에서 발생한 방향제어신호는 단방향의 신호로 발생되는 것은 극히 드물다. 순간적인 정/역 신호 발생시 증폭소자내의 전류의 흐름이 서로 겹치게 되며 이로 인해 증폭소자의 주 전원의 쇼트가 발생한다. 이럴 때 증폭소자 및 모터가 손상을 입을 수 있고

이로 인해 시스템이 파손될 수도 있다.

일반적으로 저 부하 시스템에서는 사용을 하지 않으나 이족 보행로봇은 각각의 관절들이 고부하를 받고 있는 상태이므로 반드시 필요하다고 할 수 있다.

사용된 IC는 저항과 콘덴서로서 Dead time을 결정할 수 있는 타입을 사용하였으며, 저항과 콘덴서 용량의 곱으로 Dead time이 결정된다.

Dead time의 결정은 증폭소자의 특성뿐 아니라 모터의 관성과 전기적/기계적 시정수, 그리고 부하변동의 특성을 모두 고려하여야 하므로 시간 결정은 매우 어렵다. Dead time controller에 대한 많은 연구들이 있는 것으로 알고 있으나, 명확하게 규명된 수식은 아직 존재하지 않으며, 대부분 실험적으로 Dead time을 결정하고 있다. 본 연구에서도 실험적으로 정확한 시간을 설정하여야 하지만 제어기의 Sampling time이 1msecond임을 고려하여 0.1msec 정도로 고정 사용하고 있다. 현재의 설정으로 큰 문제가 발생하지 않고 있으며, 시간을 결정을 위해 계속적인 실험 중에 있다.

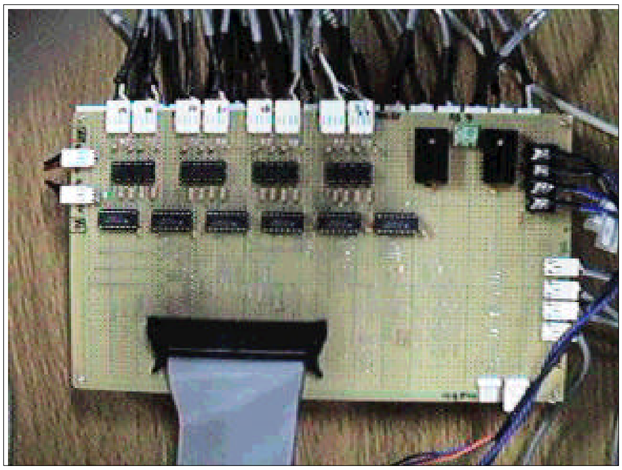
4.2.4 센서신호 전달부 설계

시스템에 사용중인 센서는 모터의 위치 신호를 발생하는 엔코더와 관절구동의 한계를 결정하고 초기 원점을 결정하는 Limit 센서, 그리고 보행시 발바닥과 지면의 부착유무를 결정하는 ON/OFF 스위치로 구성되어 있다.

사용된 모터의 엔코더는 오픈 콜렉터 방식의 출력이고 제어기의 엔코더 입력단은 라인드라이브 방식이다. 이러한 차이로 인해 엔코더 신호 전달부분이 설계되었다. 이 부분은 라인드라이브 신호를 발생하는 칩을 사용하지 않고, Photo coupler와 Schmitt trigger inverter를 이용하여 설계되어 있다.

Limit 센서는 Photo interrupter를 축 당 +/- 한 쌍씩 사용하였고, +Limit 센서는 원점센서를 겸하고 있다. Limit 센서는 볼나사 시스템의 양쪽 끝에 위치하고 있으며, +Limit 센서는 DC 서보모터의 반대부분에 위치하고 -Limit 센서는 모터쪽에 위치하고 있다. Limit 센서는 너트의 움직임 거리를 제한하고 이로서 관절의 최대회전각이 결정된다.

Pic. 4.4의 사진은 제작된 센서신호 전달부를 나타내고 있다.



Pic. 4.4 Transformation part of the sensor signal

4.2.5 전원분리부 설계

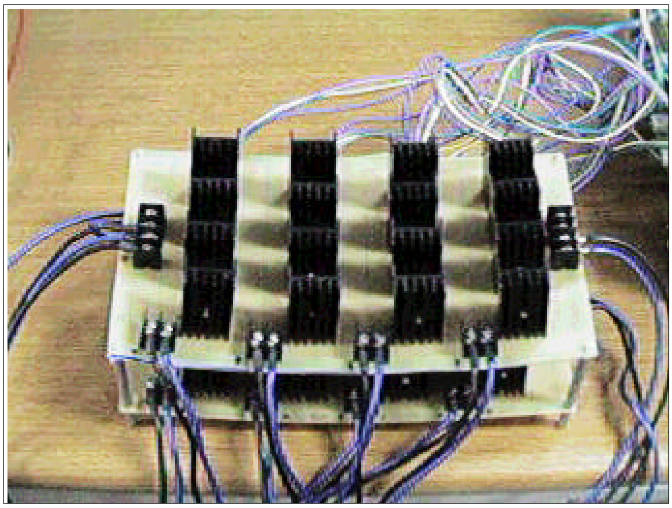
각각의 센서들과 모터는 노이즈 원이다. 이러한 노이즈 원에서 발생되는 노이즈로 인해 제어기와 PC가 이상동작을 할 수 있고, 심지어는 파손이 될 수도 있다. 따라서 PC와 MMC/MEI 제어기를 보호하기 위해 모든 신호들은 전원분리를 행하였다. PC와 제어기 그리고 인터페이스부분은 공통전원을 사용하고 있으며 외부신호들은 다른 외부전원을 사용하고 있다. 이들의 전원분리를 위해 Photo Coupler를 사용하였다. Photo Coupler는 광으로 신호만을 전달할 뿐 서로간에 전류의 흐름은 없으므로 발광 다이오드부분과 수광 트랜지스터 부분이 서로 다른 전원을 사용할 수 있는 IC소자이다.

그리고 모터 드라이브부분에서 전력소자의 제어신호와 주 전원간에도 전원분리를 행하였고, 주 전원들도 각기 다른 전원을 사용하도록 설계하였다. 현 단계에는 각기 다른 DC Power supply를 사용하여 드라이브부분의 전원을 분리하였다.

4.3 서보 모터 구동부 설계

DC 서보모터 구동부는 드라이브 부분과 DC 서보모터로 구성이 되어 있다. 모터 드라이브는 모터에 전원을 공급하는 부분으로 증폭소자를 이용하여 저전류의 제어신호를 이용하여 고전류를 발생하는 부분이다. DC 모터 드라이브는 일반적으로 양전원(바이폴라)을 사용하는 방식과 단전원(유니폴라)과 방향신호를 사용하는 방식이 있다. 본 시스템에서는 후자를 사용하였다. 증폭소자로는 IRF540 MOSFET를 사용하였고, 효율을 높이기 위해 제어전원과 주 전원을 분리하고 주 전원도 방향신호와 속도지령부분이 분리되어 있다.

모터는 구동시에 많은 노이즈가 발생한다. 그리고 고부하를 받고 있는 상태에서 정/역 전환시 역기전력이 발생하여 제어부에 손상이 가해질 수 있다. 따라서 제어전원과 주 전원은 완전히 분리되어 있어야 한다. Pic. 4.5는 제작된 드라이브 부분을 나타내고 있다. 축 당 4개의 FET로 구성되어 있고, H브릿지 형태로 구성되어 있다.



Pic. 4.5 Motor drive system

DC 서보모터는 소용량의 미니모터를 사용하였다. 모터의 자세한 사양은 Table 4.2와 같다.

Table 4.2 Specification of DC servo motor

항 목	값	단 위
Assigned Power Rating	90	[W]
Nominal Voltage	15	[$Volt$]
Stall Torque	872	[mNm]
No Load Speed	7070	[rpm]
No Load Current	245	[mA]
Starting Current	44	[A]
Max. Permissible Speed	8200	[rpm]
Max. Continuous Current	4	[A]
Max. Continuous Torque	77	[mNm]
Torque Constant	19	[mNm/A]
Speed Constant	491	[rpm/V]
Mechanical Time Constant	6	[ms]
Rotor Inertia	65	[gcm^2]

관절에 직접 모터를 부착하는 타입의 보행로봇들은 대부분 고용량의 AC 또는 DC 서보모터를 사용할 뿐만 아니라 관절에 작용하는 부하를 견디기 위해 높은 기어비의 감속기를 부착하는 형태로 사용하고 있다. 이때 모터와 감속기는 용량이 커짐에 따라 중량이 커지게 되므로 이러한 중량들로 인해 하부관절들에 더 큰 토크를 요구하게 된다. 그리고 고용량의 모터를 사용하게 되면 모터의 전원공급장치도 그만큼 커지게 된다. 이러한 문제점을 보안하기 위해 본 논문의 이족 보행로봇 개발에서는 4절 링크의 관절을 적용하였고, 소용량의 모터를 사용하였다.

적용된 4절 링크의 볼나사 시스템은 Fig. 2.1에서 보는 바와 같이 DC 서보모터와 볼나사 사이에 감속기가 추가되어 있다. 이 감속기는 현재 볼나사 시스템이 조금의 기계적 오차를 가지고 있으므로 볼나사의 효율이 많이 떨어져 있는 상태이다. Stall Torque가 크고, Stick-slip현상도 나타나고 있다. 이러한 문제점을 보안하기 위해 현재 감속기

가 추가되어 있다. 감속기가 부착되어 있으면 상대적으로 정밀도가 떨어지게 되고, 구동 속도도 떨어지게 된다. 향후 기계적인 부분이 보안이 되고 감속기를 제거하면 정밀하며 빠른 보행속도를 가질 수 있다.

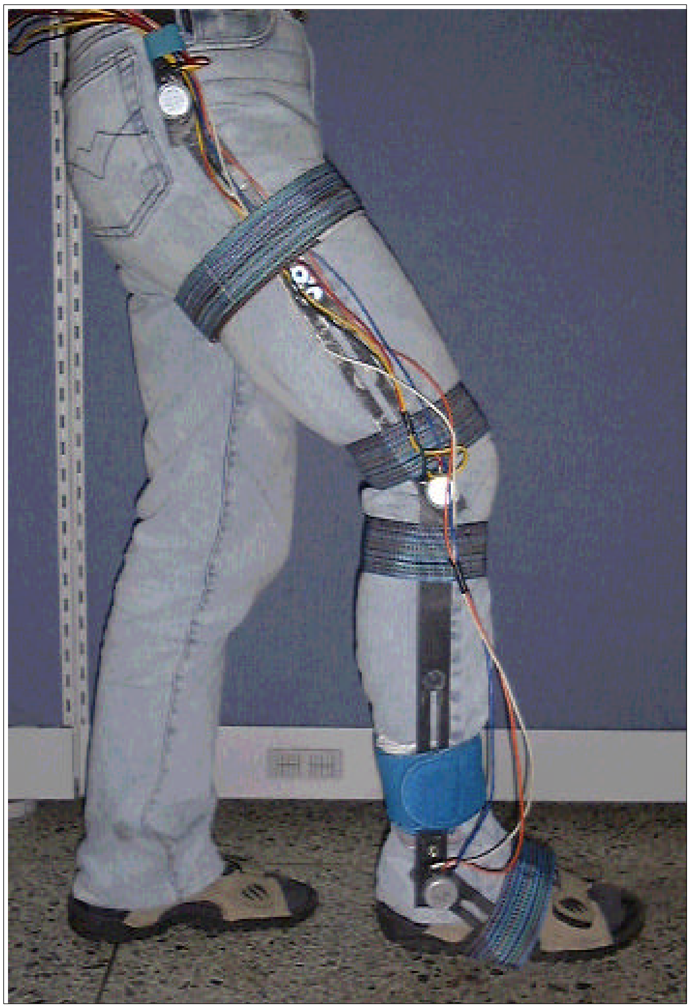
서보시스템에서는 피드백을 위한 센서가 필요하다. 적용된 모터의 위치 값을 얻기 위한 센서로는 엔코더를 사용하였다. 엔코더는 Open collector 타입으로 1회전 당 2000 펄스를 발생한다. 엔코더에서는 A, B, Z의 세 개의 상이 출력되는데 A상과 B상에 의해 위치 값이 결정되고, A상과 B상의 앞섬과 처짐으로 방향이 결정된다. 그리고, Z상은 1회전 당 1펄스가 발생되고 위치 값 보정에 사용된다. 현재 A상과 B상만을 사용하였고, 위치 값은 Limit 센서로서 보정할 수 있게 설계되어 있다.

V. 보행실험 및 고찰

이족 보행로봇의 보행 알고리즘에 대한 수많은 연구들이 수행되었다. 이러한 기존 연구들의 한계점을 극복하고 보다 다양한 걸음새를 안정되게 구현하고 적절히 제어하는 방법의 모색을 위해서는 이족 보행로봇의 안정도가 포함된 수학적 모델의 유도가 필수적이지만 여러 연구 결과에서 나타난 바와 같이 어려운 난제로 남아있다. 따라서 본 이족 보행로봇의 개발에서는 사람이 직접 보행을 하여 얻은 데이터를 로봇에 직접 적용하는 실험적인 방법을 택하였다.

이러한 방법을 이용하여 보행실험을 다음과 같은 순서를 반복하면서 행하였다.

단계 1은 제작한 모션 캡쳐 시스템을 이용하여 얻은 데이터를 컴퓨터 시뮬레이션 작업을 통하여 발목, 무릎, 힙관절의 동작데이터를 구하는 단계이다[29]. 이 때 사용된 모션 캡쳐 시스템은 기계적 방식으로 Fig. 5.1과 같이 구성되어 있고, 사용된 센서로는 각도 센서인 Potentiometer이다. 모션 캡쳐 시스템을 실제 사람에게 장착한 모습은 Pic. 5.1에 나타나있다.



Pic. 5.1 The construction of motion capture system

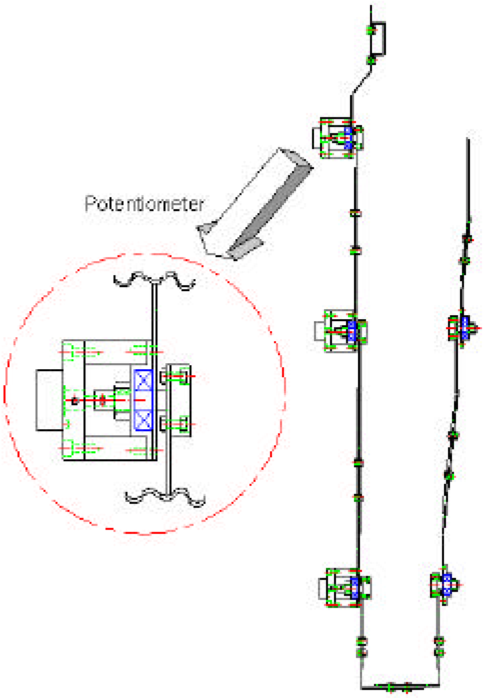


Fig. 5.1 The construction of motion capture system

모션 캡쳐 시스템을 이용하여 관절들의 동작데이터를 얻는 과정은 Fig. 5.2**와 같다**

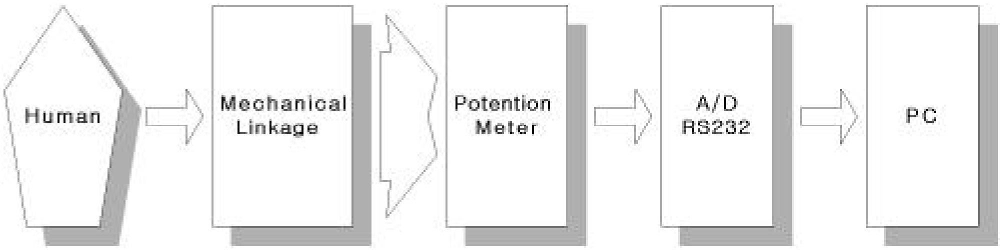
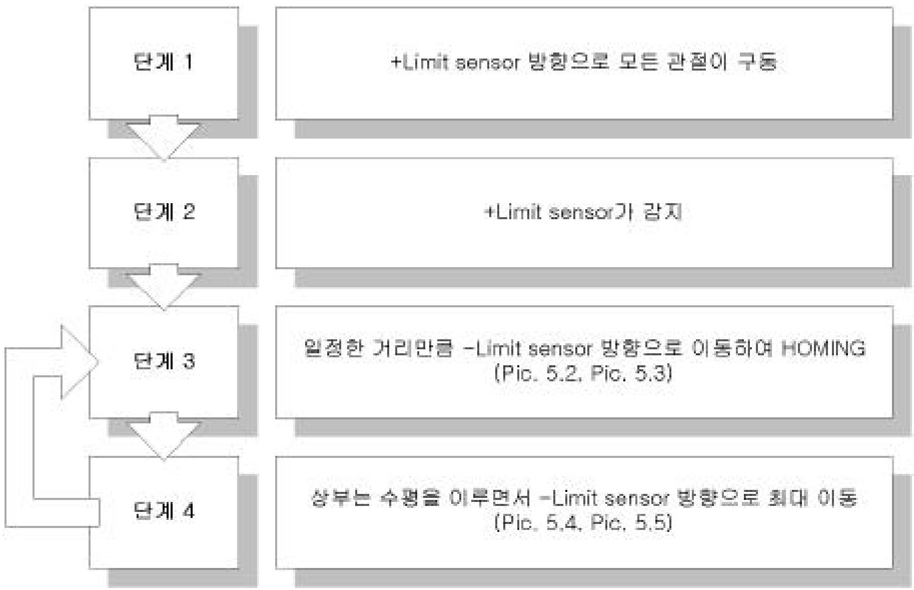


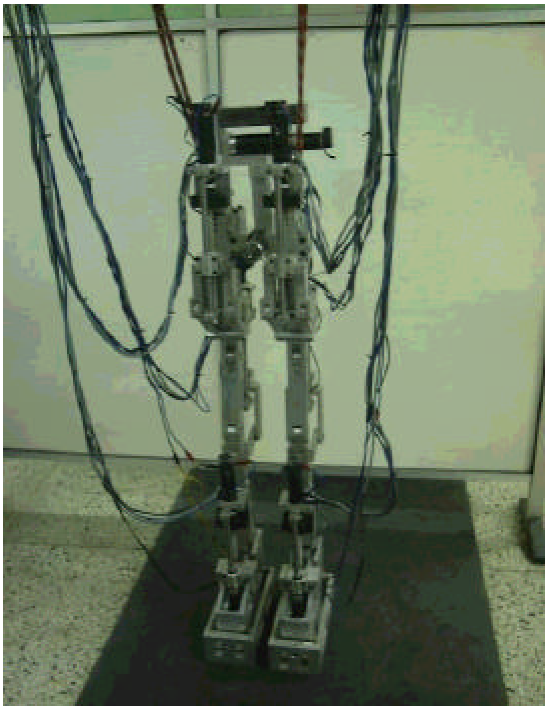
Fig. 5.2 Data acquisition process

보행실험은 우선 각 다리의 기구학적 원점과 동작의 일치성을 보기 위해 앉았다 일어서는 동작을 반복적으로 행하였다. 오른쪽 다리를 기준으로 왼쪽 다리를 동기구동 하였고, 그 모습은 Pic. 5.2, Pic. 5.3, Pic. 5.4, Pic. 5.5에 보는 바와 같다.

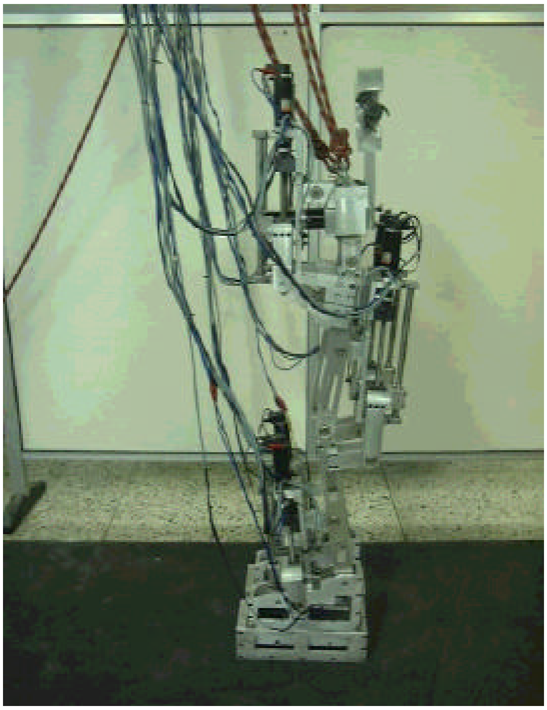
앉았다 일어서는 동작의 구동 과정은 다음과 같다.



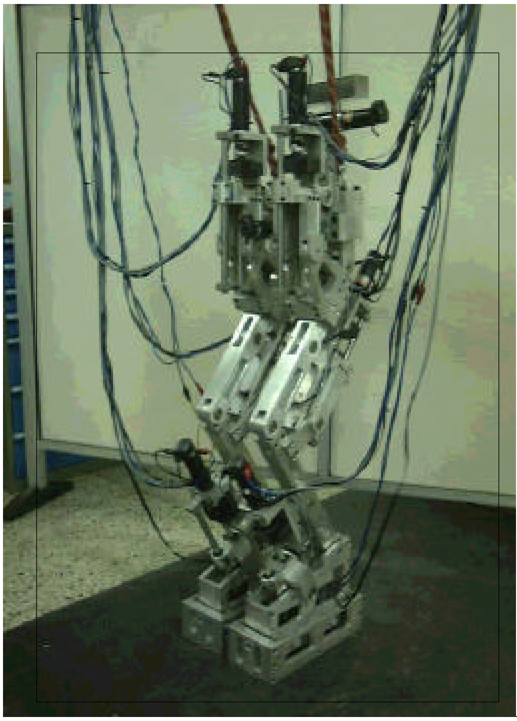
보는 바와 같이 Homing 작업과 Home의 위치에서 반대방향으로 동시적인 왕복움직임으로 앉았다 일어서는 동작이 이루어지고, 단계 3과 단계 4의 반복으로 반복적으로 앉았다 일어서는 동작을 행할 수 있다. 본 실험에서는 관절구동기의 구동 모터가 소형임에도 불구하고 매우 만족할 만한 힘과 안정성을 보유하고 있음을 알 수 있었다.



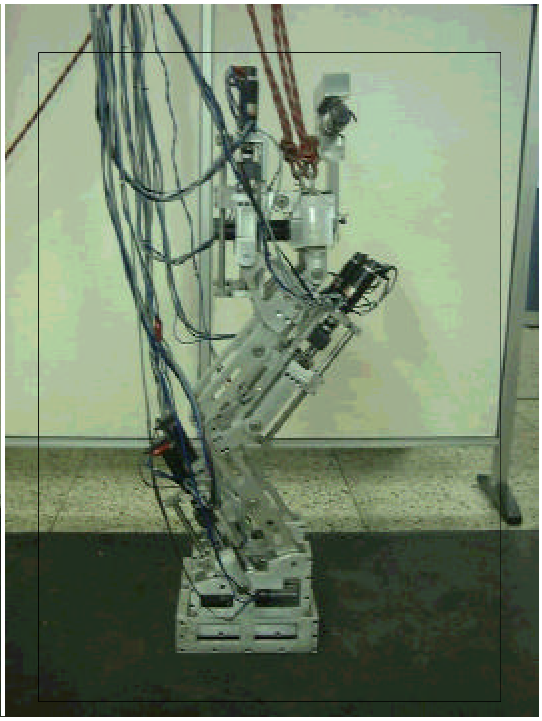
Pic. 5.2 The front view of standing position



Pic. 5.3 The side view of standing position



Pic. 5.4 The front view of bending position



Pic. 5.5 The side view of bending position

사람의 일상적인 보행과 동일한 보행을 위한 전 단계의 보행으로 균형관절을 사용하지 않고, 다리부분 만으로 보행을 하는 실험을 행하였다. 보행의 1사이클이 11개의 과정으로 이루어져 있으며, 반보를 진행하는 보행 형태이다. 반보진행 걸음새의 1사이클을 나타내면 다음과 같다.

위에서 보는 바와 같이 반보 진행 후 다시 HOMING 작업을 취한 것은 구동시 위치 센서인 엔코더의 오차와 신호전달시의 오차를 감안할 때 그 위치 값을 잃어버릴 수 있기 때문에 이 과정을 다시 행하였고, 또 이 과정을 행함으로서 다시 원점상태이므로 걸음새의 동작이 동일하게 계속적으로 이루어 질 수 있다는 점이다. 위의 과정을 반복하면 전방으로 계속적으로 걸을 수 있다.

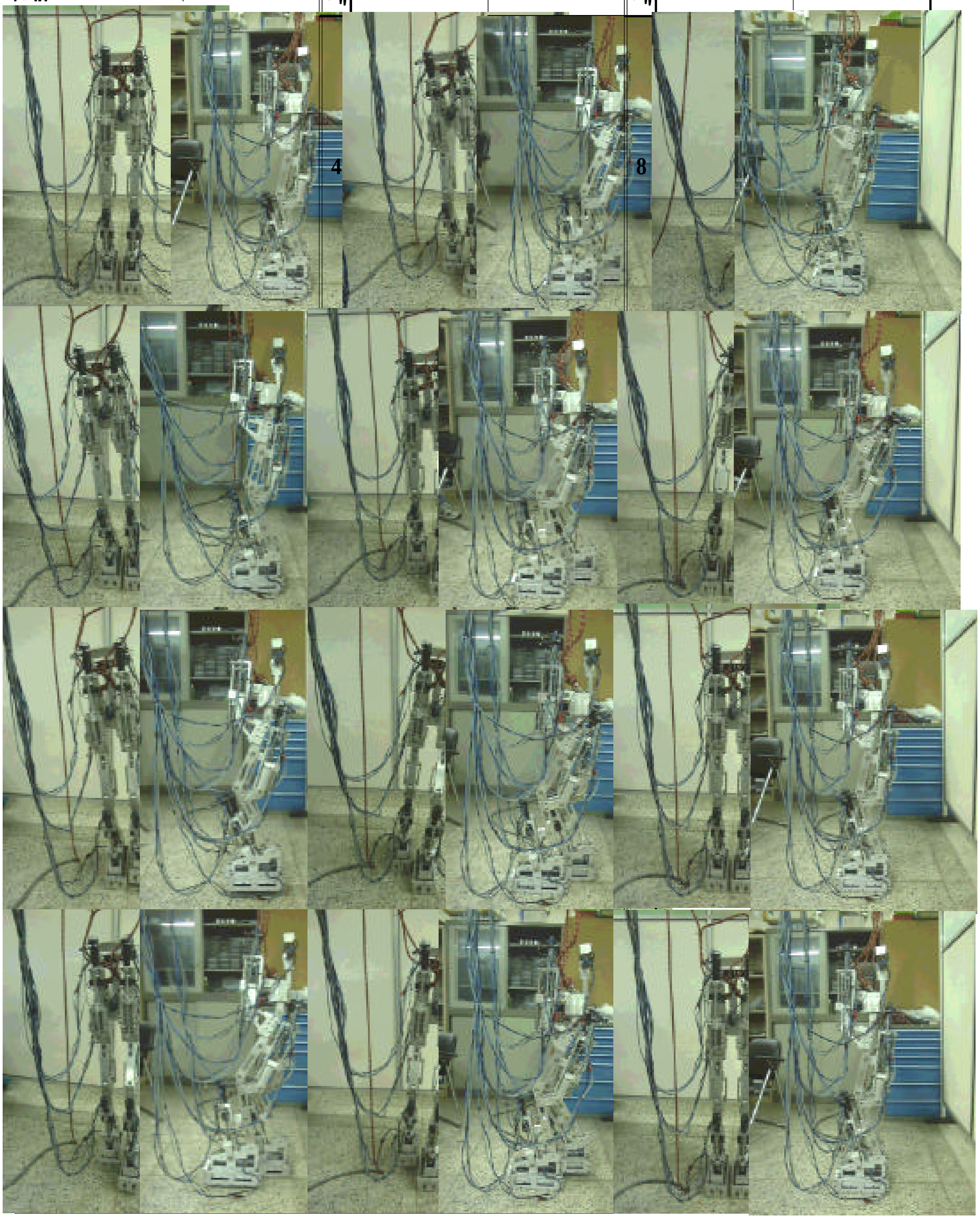
반보진행 걸음새의 보행을 단계적으로 실제사진과 같이 살펴보면 Table 5.1과 같다, 단계적으로 모습을 확대하여 살펴보면 Pic. 5.6에서 Pic. 5.27과 같다.

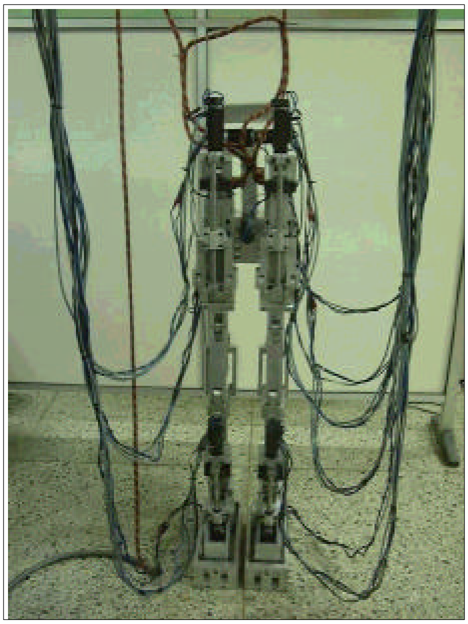
기구학적인 설계상 회전관절부분인 링크의 연결부분이 볼 베어링으로 고정된 점으로 완벽한 고정이 어려웠다. 따라서 보행시 로봇이 조금 떨리는 점이 보이나 균형관절을 사용하지 않았음에도 불구하고 매우 안정적인 보행을 할 수 있다는 것을 볼 수 있었다.

다음으로 이상과 같은 동작을 균형관절을 사용하여 동일하게 행하는 것이다. 균형관절을 사용하면 좌/우로 기울이는 각을 조금 줄일 수 있어서 걸음새가 조금 더 유연하고 안정적으로 보였다. 그 과정은 위와 동일하고 좌우로 기울일 때 기울이는 방향으로 균형관절을 기울여 주고 다리부분의 기울임은 조금 적게 하는 것이다. 균형관절을 사용한 보행 단계의 사진과 균형관절을 사용하지 않은 사진과는 사진상으로는 크게 구분이 가지 않음으로 생략한다.

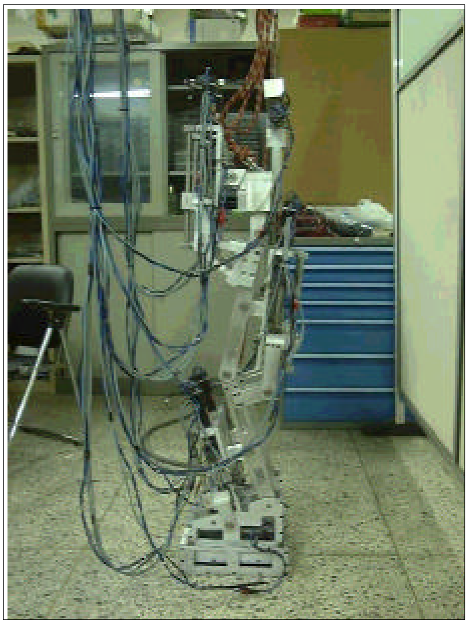
Table 5.1 A step of walking position

단계	앞모습	옆모습	단계	앞모습	옆모습	단계	앞모습	옆모습
			4			8		

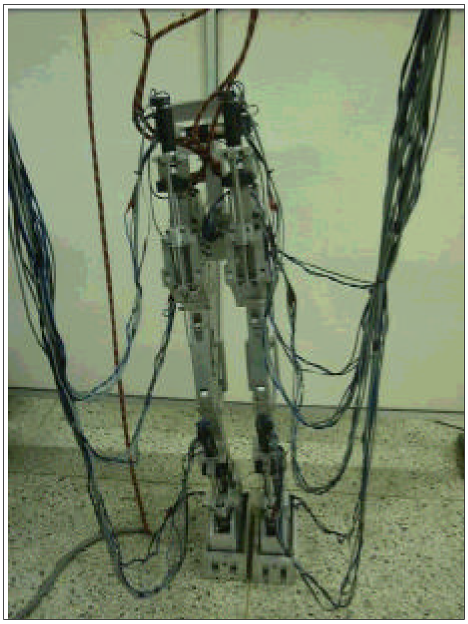




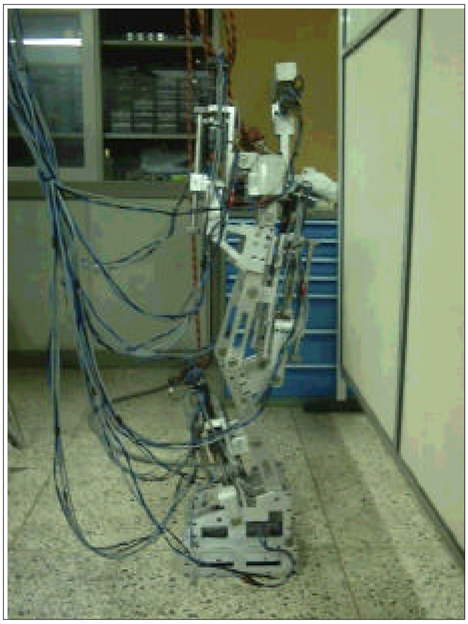
Pic. 5.6 The front view of step 0



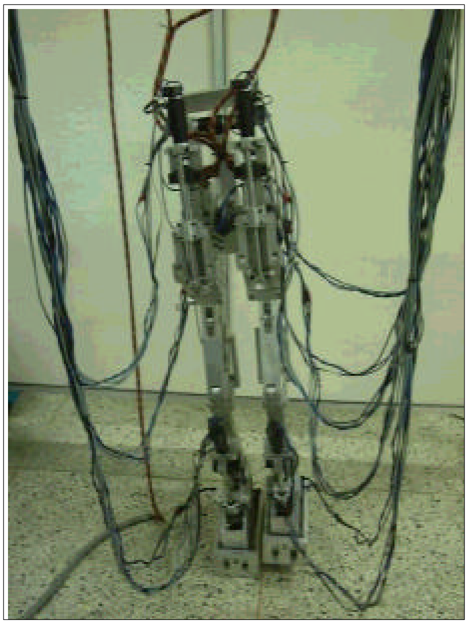
Pic. 5.7 The side view of step 0



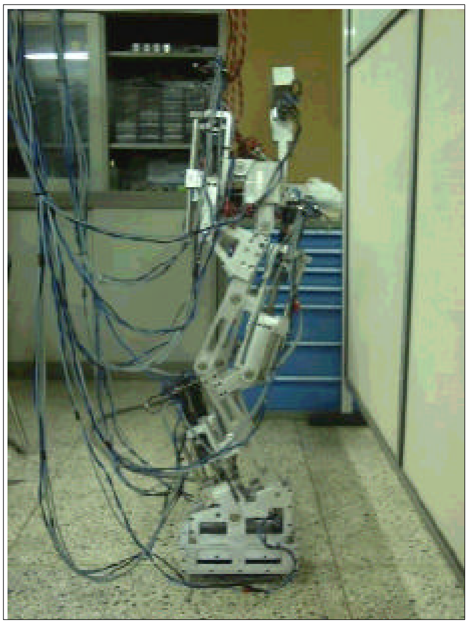
Pic. 5.8 The front view of step 1



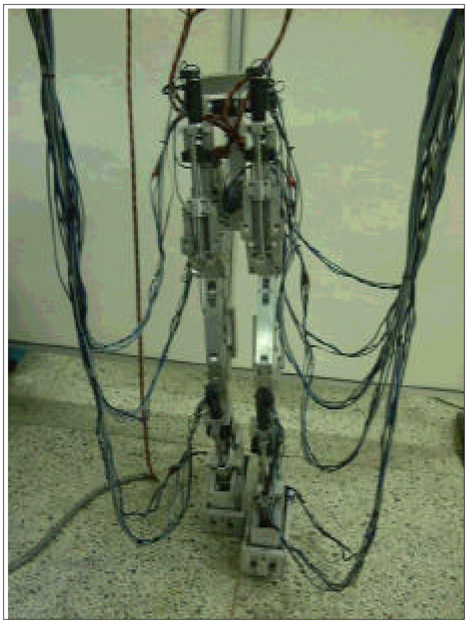
Pic. 5.9 The side view of step 1



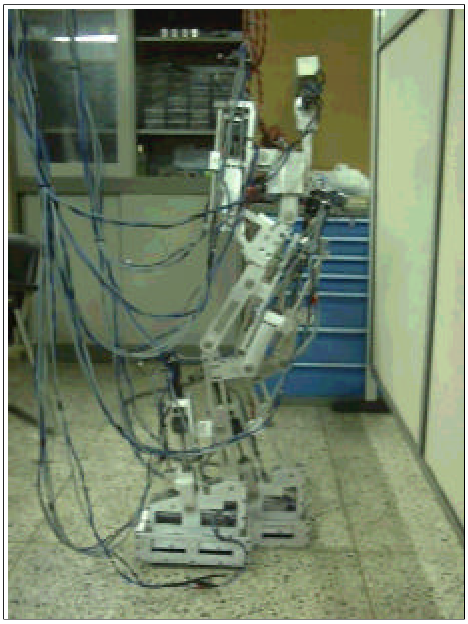
Pic. 5.10 The front view of step 2



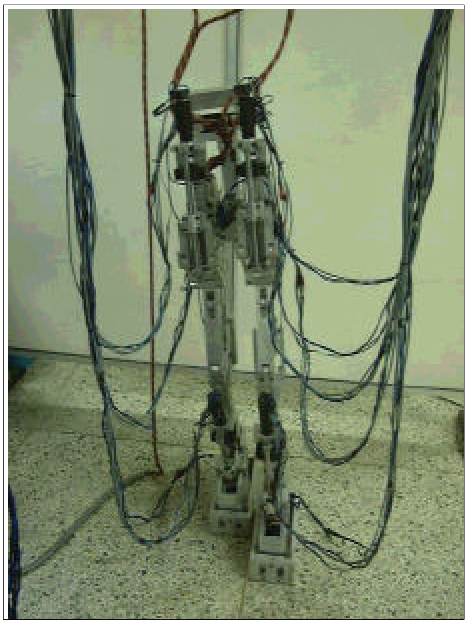
Pic. 5.11 The side view of step 2



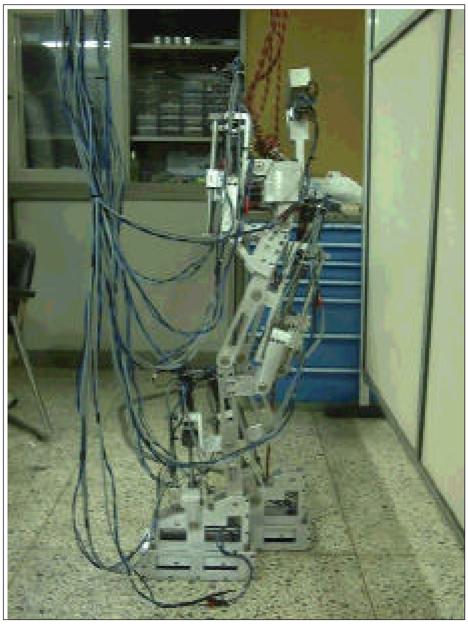
Pic. 5.12 The front view of step 3



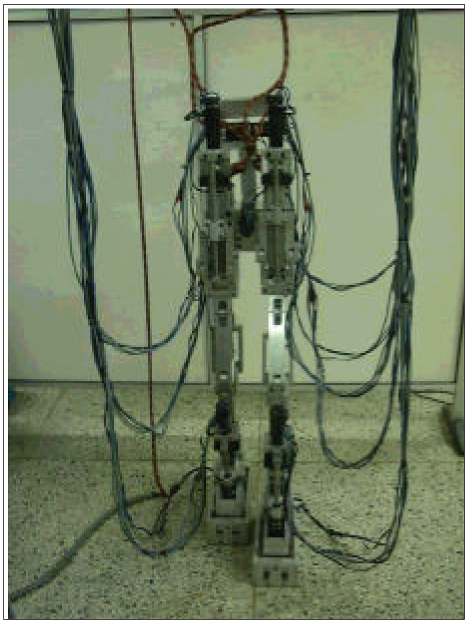
Pic. 5.13 The side view of step 3



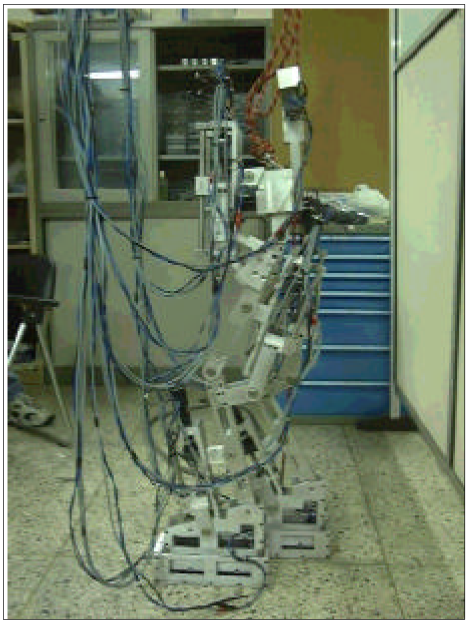
Pic. 5.14 The front view of step 4



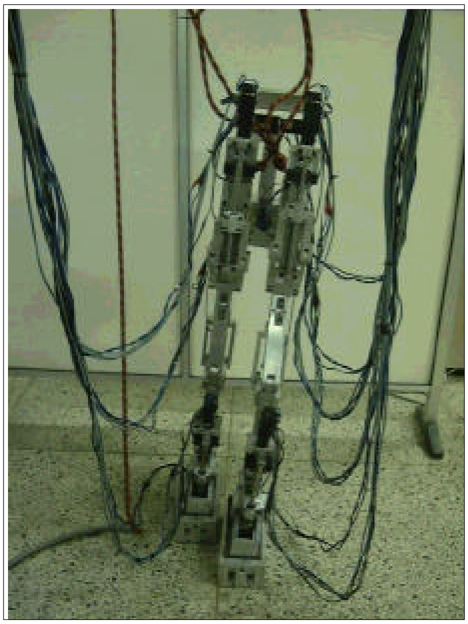
Pic. 5.15 The side view of step 4



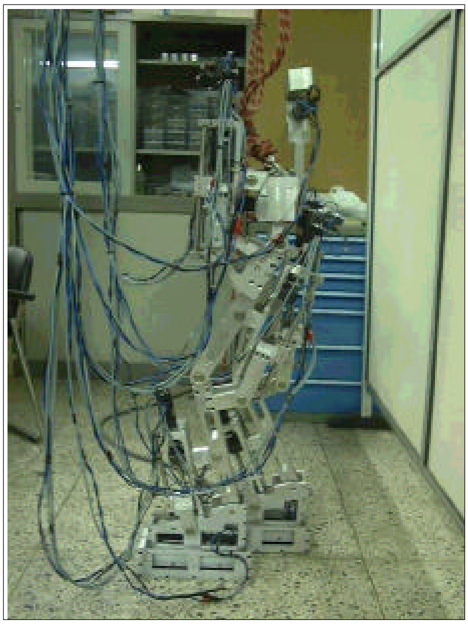
Pic. 5.16 The front view of step 5



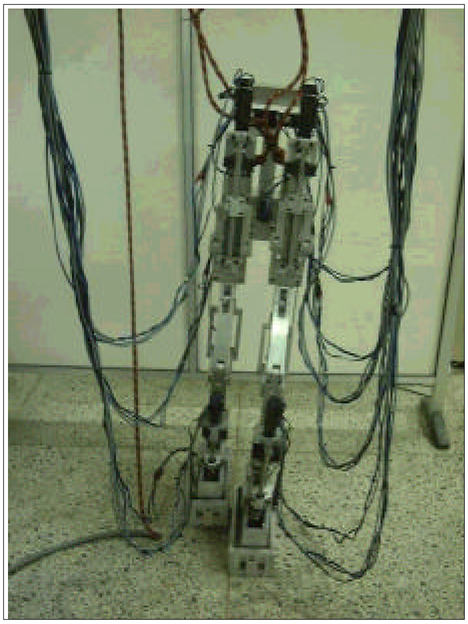
Pic. 5.17 The side view of step 5



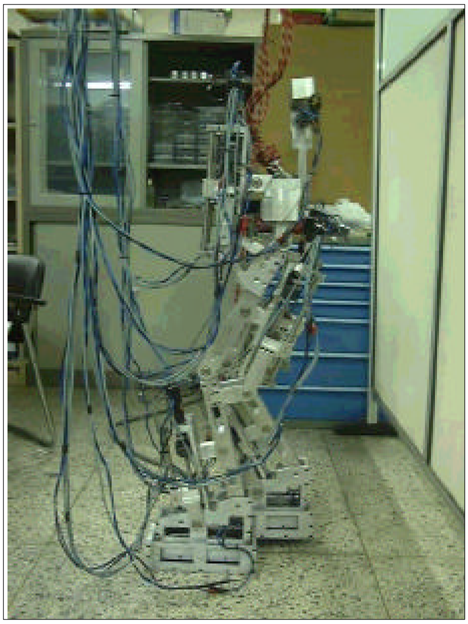
Pic. 5.18 The front view of step 6



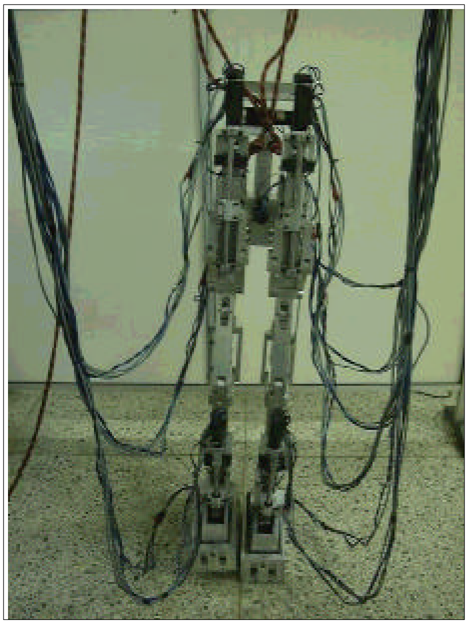
Pic. 5.19 The side view of step 6



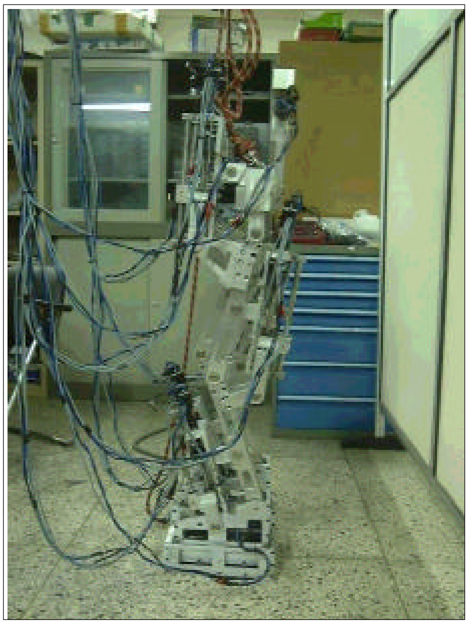
Pic. 5.20 The front view of step 7



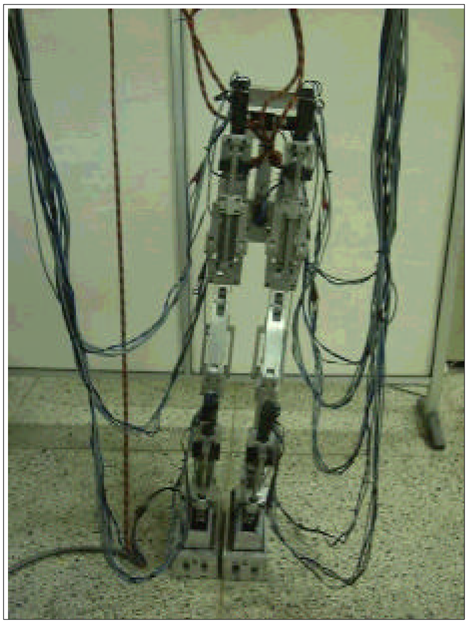
Pic. 5.21 The side view of step 7



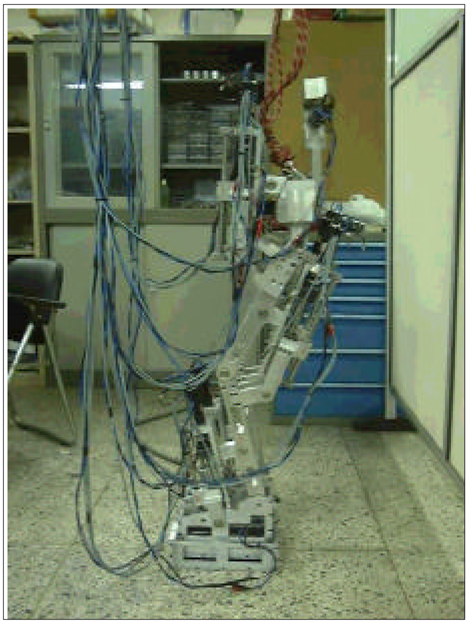
Pic. 5.22 The front view of step 8



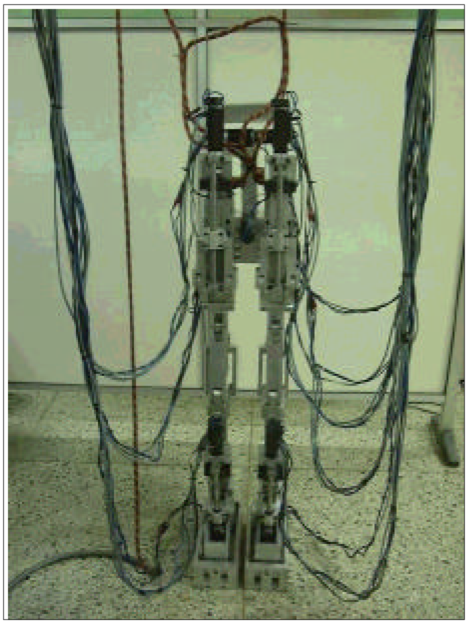
Pic. 5.23 The side view of step 8



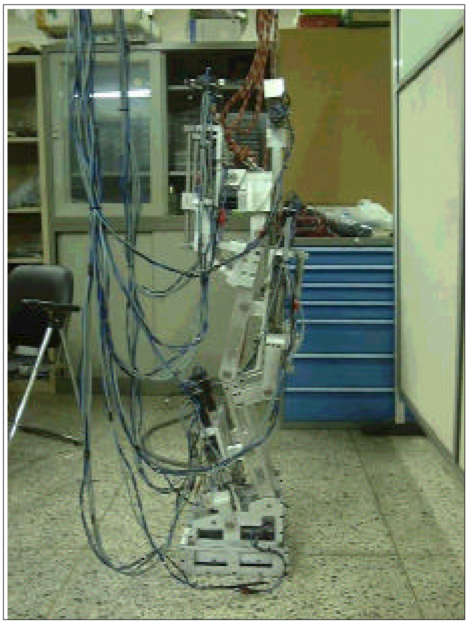
Pic. 5.24 The front view of step 9



Pic. 5.25 The side view of step 9



Pic. 5.26 The front view of step 10



Pic. 5.27 The side view of step 10

이상으로 본 논문에서 개발중인 인체형 이족 보행로봇의 보행을 사진을 통하여 단계적으로 살펴보았다. 위의 그림들에서 보는 바와 같이 적은 용량의 구동기를 사용하였음에도 불구하고 매우 안정적인 보행을 하는 것을 볼 수 있었다.

Ⅵ. 결 론

본 논문에서는 기존의 개발된 이족 보행로봇의 토크와 안정성의 한계점을 극복하기 위하여 고 강성, 높은 토크 변화율을 갖는 볼나사를 이용하는 4절링크 구조의 관절구동기를 채용한 인체형 10자유도 이족 자율보행로봇을 개발하였다. 로봇의 개발과정으로 관절구동기에 대한 기구학 및 동역학 해석을 행하였고, 3자유도의 다리부분에 대한 기구메커니즘을 유도하였다.

이족 보행로봇의 개발은 실제 보행을 목표로 메카니즘 설계와 실험적으로 접근하였고, 로봇의 구동을 위한 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 보행실험을 수행하였다. 로봇은 보행명령에 따라 원활한 보행동작을 수행하였다. 이족 보행로봇에 채용한 4절링크 구조의 관절구동기는 소용량의 모터를 사용하였음에도 불구하고 보행을 수행하는데 충분한 토크와 강성을 보여주었다.

이족 보행로봇의 연구 및 개발 결과로 볼나사를 이용한 이족 보행로봇 및 다족 보행로봇의 구동기 설계기술과 제어기술을 확보할 수 있었다.

이족 보행로봇은 근본적으로 인간의 형상과 기능을 가지므로 많은 부분에서 인간의 역할을 수행할 수 있다. 인간이 수행하기 어려운 원자력 발전소 내의 방사능 영향지역에서 인간을 대신하여 작업을 수행하거나 Mobile robot이 활동할 수 없는 경사지역, 요철 및 계단이 있는 환경에서 작업을 수행할 수 있다. 볼나사의 감속비 조정으로 고토크를 낼 수 있고, 이를 이용하여 인간이 들 수 없는 무거운 작업물체의 이송을 수행할 수도 있다. 또 의용 공학용으로 인간의 보행 시뮬레이터로 활용할 수 있으며, 군사용 장비나 극지 탐사용 등의 분야에의 활용이 가능하다.

이와 같이 이족 보행로봇은 그 활용분야가 넓고, 최첨단 기술이 어우러진 복합적 시스템이므로 아직도 개발의 여지가 많이 남아 있다. 보행방법 등을 응용한 완구 상품은 시장에서 범위와 영향력을 급속히 넓히고 있고, 일본의 HONDA Company에서 개발한 이족 보행로봇은 거의 상품화에 가까운 수준으로 조만간 전세계의 로봇시장을 장악할 것은 의심할 여지가 없다.

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

참고문헌

[1] A. Takanishi, 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] F. Gubina, H. Hemami., R. B. McGhee, "On the Dynamic Stability of Biped Locomotion", IEEE trans. on Biomd. Engineering, Vol, BME-21, pp.102-108, 1974.

[3] T. T. lee and J. Liao, "Trajectory Planning and Controlk of a 3-link Biped Robot", IEEE Robotics and Automation, pp. 820-823, 1988.

[4] M. Cotsatis and C. Vibet, "Decoupled control for 2D N-link Biped Walking System", Robotics and Autonomous Systems 5 pp.97-107, 1989.

[5] J. Furusho, A. Sano, "Sensor-Based Control of a Nine-Link Biped", Int.J.Robot.Res., vol.9, No.2, pp.83-98, 1990

[6] C. L. Golliday, H. Hemami, "An Approach to Analyzing Biped Locomotion Dynamics and Designing Robot Locomotion Controls", IEEE, Transactions on Automatic Control, vol.AC-22, No.6, pp.963-972, 1977.

[7] T. Chang and Y. Hurmuzlu, "Sliding Control without Reaching Phase and its Application to Bipedal Locomotion", J. of Dynamic Systems, Measurement, and Control, vol.447-455, 1993.

[8] M. Vukobratovic and J. Stepanenko, "Mathematical Models of General Anthropomorphic Systems", Mathematical Biosciences 17, pp.191-242, 1973.

[9] K. J. Waldron, "Realization of Dynamic Biped Walking Stabilized with Trunk Motion Under Known External Force", Advanced Robotics, pp.299-310, 1989.

[10] S. H. Lim and J. G. Kim, "Biped Locomotion with Mechanical Compliance", (In Korean) Korea Robotics and Automation Workshop Conference, pp.21-25, 1992.

[11] Kawamura S. et al. "Realization of Biped Locomotion by Motion Pattern Learning", (In Japanese) Journal of Robot Society of Japan vol.3, No.3, pp.177-180, 1985.

[12] C. L. Shih, "Analysis of the Dynamics of a Biped Robot with Seven Degrees of Freedom", IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp.3008-3013, 1996.
[13] T. A, Egusa. Y, Tochizawa. M, Takeya. M, and Kato. I, "Realization of Dynamic Biped Walking Stabilized with Trunk Motion", RoManSy 7: Proc. Seventh CISM-IFToMM Symposium on Theory and Practice of Robots and Manipulators, A.Morecki, G.Bianchi and KoJaworek, Eds. Hermes, Paris, pp.68-79, 1990.
[14] J. I. YAMAGUCHI, A. TAKANISHI, and I. KATO, "Development of a Biped of a Biped Walking Robot Compensating for Three-axis Moment by Trunk Motion", IEEE/RSJ Internal Conference on Intelligent Robots and System, pp.561-566, 1993.
[15] M. Yamada, J. Furusho, A. Sano, "Dynamics Control of Walking Robot with Kick-Action", ICAR, pp.405-412, 1985.
[16] Eric R. Dunn, Robert D. Howe, "Toward Smooth Bipedal Walking", IEEE, pp.2489-2494, 1994.
[17] T. Fukuda, Y. Komata, T. Arakawa, "Recurrent Neural network with Self-adaptive Gas for Biped Locomotion Robot", IEEE, pp.1710-1714, 1997.
[18] J. Hu, J. Pratt, G. Pratt, "Adaptive Dynamic Control of a Bipedal Walking Robot with Radial Basis Function Neural Networks", Proceedings of the 1998 IEEE/RSJ Intl, Conference on Intelligent Robots and Systems, pp. 400-405, 1998
[19] K. Ohnishi, M. Shibata and T. Murakami, "Motion Control for Adavanced Mechatronics", IEEE/ASME Trans. on Mechatronics, Vol.1, No.1, pp.56-67, 1996.
[20] K. Ohishi and M. Ohishi, "Robust and Easy Realization of Hybrid Control Based on H∞ Velocity Controller, Proc. of 26th International Symposium on Industrial Robots, Vol.1, pp.197-202, 1995.

[21] Q. Li, A. Takanishi, and I. KATO, "Learning Control for a Biped Walking Robot with a Trunk", IEEE/RSJ Internal Conference on Intelligent Robots and System, pp.1771-1777, 1993.

[22] 김창부, 조현석, "이족보행로봇의 궤적의 최적화 계획에 관한 연구", 한국정밀공학회지 제 15권 제 3호(1998년 3월), pp.157-167, 1998

[23] Y. F. Zheng, "Acceleration Compensation for Biped Robots to Reject External Disturbance", IEEE Trans. Sys. Man. and Cyber. pp.74-84, 1989.

[24] J. Yamaguchi, D. Nishino, A. Takanishi, "Realization of Dynamic Biped Walking Varying Joint Stiffness Using Antagonistic Driven Joints", International Conference on Robotics & Automation Proc. of IEEE, pp.2022 2029, 1998.

[25] M. W. spong, M. Vidyasagar, "Robot Dynamics and Control", John Wiiley & Sons, 1989.

[26] Golstein. H, "Classical Mechanics", Addition-Wesley", Reading, MA, 1981.

[27] C. L. Shih, Y. Z. Li, S. Chung, T. T. Lee, and W. A. Gruver, "Trajectory Synthesis and Physical Admissibility for a Biped Walking Robot During the Single-Support Phase", IEEE int. Conf. Robotics and Automation, pp. 1646-1652. 1990.

[28] 최형식, 이호식, 박용헌 "볼나사 구동기를 갖는 로봇다리의 모델링", 한국정밀공학회 춘계학술대회논문집 II, pp.583-586, 2000. 5.

[29] 최형식, 박용헌, 이호식, 김영식, "인체형 이족 보행로봇의 개발", 한국정밀공학회 추계학술대회논문집, pp.15-18, 2000. 11.

[30] 최형식, 김명훈, 김영식, 전대원 "이족 보행 로봇의 걸음새 구현을 위한 모션 캡쳐 시스템" 한국정밀공학회 추계학술대회논문집, pp.114-117, 2000. 11.