공학석사 학위논문

10 자유도 이족보행로봇의 개발 및 운동식의 모델링

Development of 10 Degree-of-freedom Biped Walking Robot and Modeling for the Dynamics

지도교수 최 형 식

2001년 2월

한국해양대학교 대학원

기계공학과

이 호 식

본 논문을 이호식의 공학석사 학위논문으로 인준함

위원장 공학박사 진 강 규 (인)

위 원 공학박사 정 재 현 (인)

위 원 공학박사 최 형 식 (인)

2000年 12月22日

한국해양대학교 대학원

기계공학과

이 호 식

Development of 10 Degree-of-freedom Biped Walking Robot and Modeling for the Dynamics

Ho - Sik Lee

Department of Mechanical Engineering
Graduate School, Korea Maritime University

ABSTRACT

The speed of development of biped robots has been slow despite of much interest and investment for research since 1960's. One of main reasons is that the actuators with the speed reducer had weakness in supporting the weight of the body and leg itself. To overcome this, a new four bar link mechanism actuated by the ball screw is proposed. The four bar mechanism has higher strength and gear ratio than conventional actuators to actuate the leg of the biped robot. Using this, new autonomous type of 10 degree-of-freedom biped robot is developed to perform autonomously such that it is actuated by small torque motors and boarded with a DC battery and controllers. One leg was designed to have ankle, thigh, and hip joints. Each leg of the robot composes of three pitch joints and one roll joint. The dynamics model of the biped robot is investigated. In the modeling process, the robot dynamics are expressed in the joint coordinates using the Euler-Lagrange equation. Then, they are converted into the sliding joint coordinates, and joint torques are expressed in the forces along the sliding direction of the ball screw. To validate the model of the robot, a computer simulation is performed and the developed biped robot performs motions of sitting-up and down. Through a series of the experiments, the capability of biped-walking can be found.

사 용 기 호

Γ	일반화 힘(Generalized force)
K	매니퓰레이터에 작용하는 총 운동 에너지
m_i	각 회전링크의 질량
V	매니퓰레이터에 작용하는 총 위치에너지
L	Lagrangian ($K - V$)
$S(\omega)$	왜대칭 행렬
I_i	각 회전링크의 관성 모멘트(Inertia moment)
J_{vci}	각 회전관절의 선속도 자코비안 ($R^{3\times7}$)
J_{wi}	각 회전관절의 각속도 자코비안 ($R^{3\times7}$)
D	회전관절공간의 관성행렬 ($R^{7\times7}$)
C	회전관절공간의 원심력 및 코리올리력 ($R^{7\times7}$)
Φ_i	기저 좌표계에 대한 각 링크의 위치에너지
O_i	기저 좌표계에 대한 각 관절의 회전중심
M_{X_i}	기저 좌표계를 기준으로 한 각 회전링크의 질량중심
M_{Y_i}	기저 좌표계를 기준으로 한 각 회전링크의 질량중심
q_i	각 회전관절의 관절 변위
l_i	각 회전 링크의 길이
l_{ci}	각 회전 링크의 질량중심 거리
d_i	각 관절의 볼나사의 미끄럼 변위

F_i	**각 관절에 가해지는 미끄럼 방향의 힘**
τ_i	**각 관절의 회전중심**(O_i)**에 작용되는** Torque
H	**미끄럼 관절공간의 관성행렬** ($R^{7\times7}$)
Q	**미끄럼 관절공간의 원심력 및 코리올리력** ($R^{7\times7}$)

목　　　차

표 목차

그림 목차

Ⅰ. 서론

1.1 연구 배경

60년대 후반 Vucobratobic가 이족보행로봇에 관한 모델링을 제안한 이후 이족보행로봇에 대한 많은 연구가 수행되었다. 연구 시기별 단계에 따라 크게 이족보행로봇의 모델링과 제어, 그리고 이족보행로봇 걸음새나 몸체추진궤적을 포함한 제어로 나뉠 수 있다. 또한, 연구 방법에 따라 이족보행로봇의 걸음새나 몸체의 모델링 및 제어와 같은 이론적 연구와 실 시스템의 보행을 목적으로 하는 Mechanism 설계와 실험적 연구로 분류할 수 있다. 초기형태의 이론적 연구로서 이족보행로봇의 모델링과 제어는 로봇의 외형에 따라 다리부만 고려한 연구와 다리부와 균형관절을 포함한 보다 복잡한 형태의 연구형태로 분류할 수가 있다. 전자의 경우로 동적 보행 시에 로봇의 걸음새 동작의 특성을 파악하고 이를 제어하는 연구[1][2], 3 자유도 이족보행로봇의 토크를 줄이기 위하여 경로계획을 이용한 제어[3], 5 자유도의 이족보행로봇의 운동방정식을 Direct- nonlinear-decoupling 방법에 의해 선형화시켜 거동을 제어하는 연구[4], 토크센서를 이용하여 9자유도의 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 이족보행로봇은 반드시 걸음주기나 보폭, 방향전환 등과 같은 걸음새를 변경할 수 있어야 한다. 그러나 하체의 다리부로만 구성된 이족보행로봇은 그렇지 않은 이족보행로봇에 비하여 걸음새 변경능력이 미미하거나 훨씬 복잡한 알고리즘을 필요로 하며, 보행전 균형점 궤적이나 균형운동을 검증하거나 결정하기 어려운 단점이 있다. 이를 해결하기 위하여 시스템의 안정도 보상을 위한 상부에 균형관절을 갖는 형태의 이족보행로봇에 대한 연구를 수행하였다[9-25]. 유각의 동 특성과 중력가속도에 대한 보상의 형태로 고려되어온 이족보행로봇의 균형관절은 그 개념이 소개된 이후 직진운동관절[16][17][21][37]과 회전운동관절[9][10][12]의 두 가지 형태가 병존해 왔다.

1990년대 후반의 연구들은 이족 보행 걸음새나 로봇의 몸체 추진 궤적에도 관심을 보여왔다[26][27]. 이들 연구들은 전형적으로 역동력학(Inverse dynamics)연산에 의한 토크제어를 기본으로 하거나[28] 신경회로 알고리즘을 이용하여 걸음새를 구현하

였다[29][30]. 이외에도 외란 관측기[31], H^{∞} 제어기 등을 이용하여 강인한 제어를 구현하거나[32], 균형을 학습에 의해 개선시키는 연구[33], 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[34], 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 이족보행로봇의 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 상하체 관절, 균형 및 보행을 제어하는 제어 시스템 구성의 두 방법이 고려되어야 한다. 구동기에 대한 초기 연구로 유압시스템이 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 구동 토크 변화율의 한계 및 로봇의 크기에 제한을 둘 수밖에 없는 구조적 한계점을 가지고 있다[34]. 이를 해결하기 위하여 스프링 메커니즘을 이용하여 구동기의 토크를 높이는 연구[35]가 수행되었지만 여전히 만족할 만한 강성을 얻지 못하고 있다. 따라서 규모에 있어서 소형이며 고강성을 가지며 높은 기어비로 고토크를 구현할 수 있는 구동기의 개발 없이는 이족보행로봇의 원활한 보행은 한계가 있고, 따라서 이족보행로봇의 개발은 그 의미를 잃게된다. 상하체 관절, 균형 및 보행을 제어하는 제어 시스템 구성된 가장 발전적인 형태로는 Honda사에서 개발한 PS시리즈 로봇이 있다[36]. 기술한 연구결과물 외에도 이족보행로봇과 연관된 수많은 연구가 이미 수행되었고 수행되고 있으나, 거의 대부분은 외국에서 이루어진 것이다. 국내에서는 일부 이와 관련된 연구들이 수행되고있으나 [16][20][24][34][37], 대부분 이론적 연구들에 치중하고 있고, 이족보행로봇을 직접 제작하여 실험적으로 연구를 수행한 경우는 제한적이다[37].하지만, 문헌 [12]에서 연구한 성과물도 구동기의 한계로 인하여 골반까지 58cm 정도의 소형 로봇에 한정되어 있다.

1.2 연구 내용

60년대 후반부터 이족보행로봇에 대한 많은 연구들이 수행되어 왔지만, 개발 속도는 관심과 투자 시간에 비하여 매우 느린 편이었다. 여러 이유들이 있겠지만, 이들 중 하나는 현재까지 개발된 보행을 수행하기 위한 구동관절이 인간의 관절에 비하여 토크가 매우 약하다는 것이다. 이들의 각 관절은 모터로 구동하는 구조로 되어있어서 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 보행 로봇은 이동시스템이므로 자체에 동력원을 탑재하게 되는데 이것이 부가적인 구동부하로 작용한다. 대부분의 이족보행로봇은 감속기를 채용한 모터를 직접 회전 관절에 부착하는 구조로 되어있다. 이 방법은 구동모터의 구동토크 한계와 감속기의 강성의 한계로 로봇의 크기에 제한을 둘 수밖에 없는 구조적 한계점을 가지고 있다.

본 논문에서는 이러한 한계점을 극복하기 위하여 고 강성의 높은 기어비를 갖는 볼 나사를 사용하여 새로운 구조의 인체형 10자유도 이족 보행로봇을 개발하였다. 구동형태는 사절 링크구조에 볼나사를 채용하여 회전링크의 한 변을 볼나사를 사용하여 직선운동으로 대체한다. 직선운동은 서로 연결된 다른 링크의 회전각을 변환시키고 궁극적으로 로봇 다리의 회전축을 구동한다. 이 다리 두 개를 조합하면 이족보행로봇의 본체가 된다. 로봇의 본체는 자립형(Autonomous type)으로 개발하고 각 다리에 Pitch 축 3개와 Roll 축 1개씩 8자유도로 구성하고 균형관절을 각각 Pitch 축 1개와 Roll 축 1개를 포함한 총 10 자유도 형태로 구성된다. 개발된 이족보행로봇에 대한 시스템의 모델링 및 운동 방정식을 유도한다. 운동 방정식은 Euler-Lagrange 방정식을 이용하여 회전관절 공간에서 이족 로봇의 동역학 방정식을 유도한 후, 사절링크 기구의 구동을 위한 볼나사의 미끄럼관절 공간에서의 운동방정식으로 변환한다. 제어 입력의 형태도 관절구동을 위한 토크 입력을 볼 나사 구동방향에 대한 힘의 입력으로 변환한다.

Ⅱ. 이족보행로봇의 동역학 모델링

본 논문에서는 하나의 Pitch와 Roll 관절로 이루어진 균형관절을 이용하여 Fig 2.1 과 같은 균형공간을 갖도록 구성하고, 각각 3개의 Pitch 관절과 발목 부에 1개의 Roll 관절로서 양다리를 구성하였다. 따라서 다리부는 8 자유도이며, 보행 시 균형을 유지하는 균형관절은 2 자유도를 갖는 총 10 자유도 이족 보행로봇을 제작하였다. 이족 보행의 경우에는 방향전환을 위한 1축, 각 다리의 관절구동을 위한 3축 및 발목의 Roll 관절을 위한 1축과 같이, 각각의 다리에 5 자유도를 필요로 하나 본 논문에서는 직선보행을 위한 자유도인 3 자유도와 발목의 Roll 관절을 포함한 4 자유도를 부여하여 제어축 수를 결정하였다. Fig 2.1 에서 보이는 바와 같이 제작된 이족 보행로봇의 기구학적 모델은 여타의 다른 이족 로봇과 같이 여러 개의 자유도가 종속적으로 연결되어 있다. 이 기구학적 모델의 해석방법은 폐쇄적 기구연쇄 방법(Closed kinematics chain)을 사용하여 총 10자유도 중에서 전방보행에 대한 7 자유도의 기구학 및 동역학 해석을 수행하였다. 이를 위하여 Fig 2.2 ~2.3 과 같이 각 링크에 대한 질량중심 길이 및 기구학적 질량 모델을 설정하였다.

이족 로봇은 발이 지면과의 접촉상태에 따라 동역학적 해석이 달라지는데, 본 논문에서는 보행 동작 중 한쪽지지 상태의 동역학 해석을 수행하였다. 운동방정식을 고찰하기 위하여 지지부 한쪽다리를 모델로 한다면, 다리는 기본적으로 인간과 같이 발목, 무릎 및 힙과 같은 측면의 축을 중심으로 회전하는 3자유도 시스템으로 구성되며 평면에 놓인 다리의 발바닥에 기저 좌표 계를 설정하였다. 제안된 시스템의 동역학 방정식을 유도하기 위하여 우선, Euler-Lagrange 방정식을 이용하여 회전관절 공간에서의 동역학식을 유도한 후, 4절 링크기구의 운동방정식을 유도하여 궁극적으로 볼나사 좌표 계에서의 방정식으로 표현하였다.

2.1 수학적 모델의 유도

구속력(Constraint force)이 가상일 원리(Principle of virtual work)를 만족할 때 홀로노믹 구속조건 하에서 기계시스템의 거동을 나타내는 미분 방정식을 Euler-Lagrange 방정식이라고 한다. 유도 방법에는 Hamilton의 최소 작용원리(Hamilton's

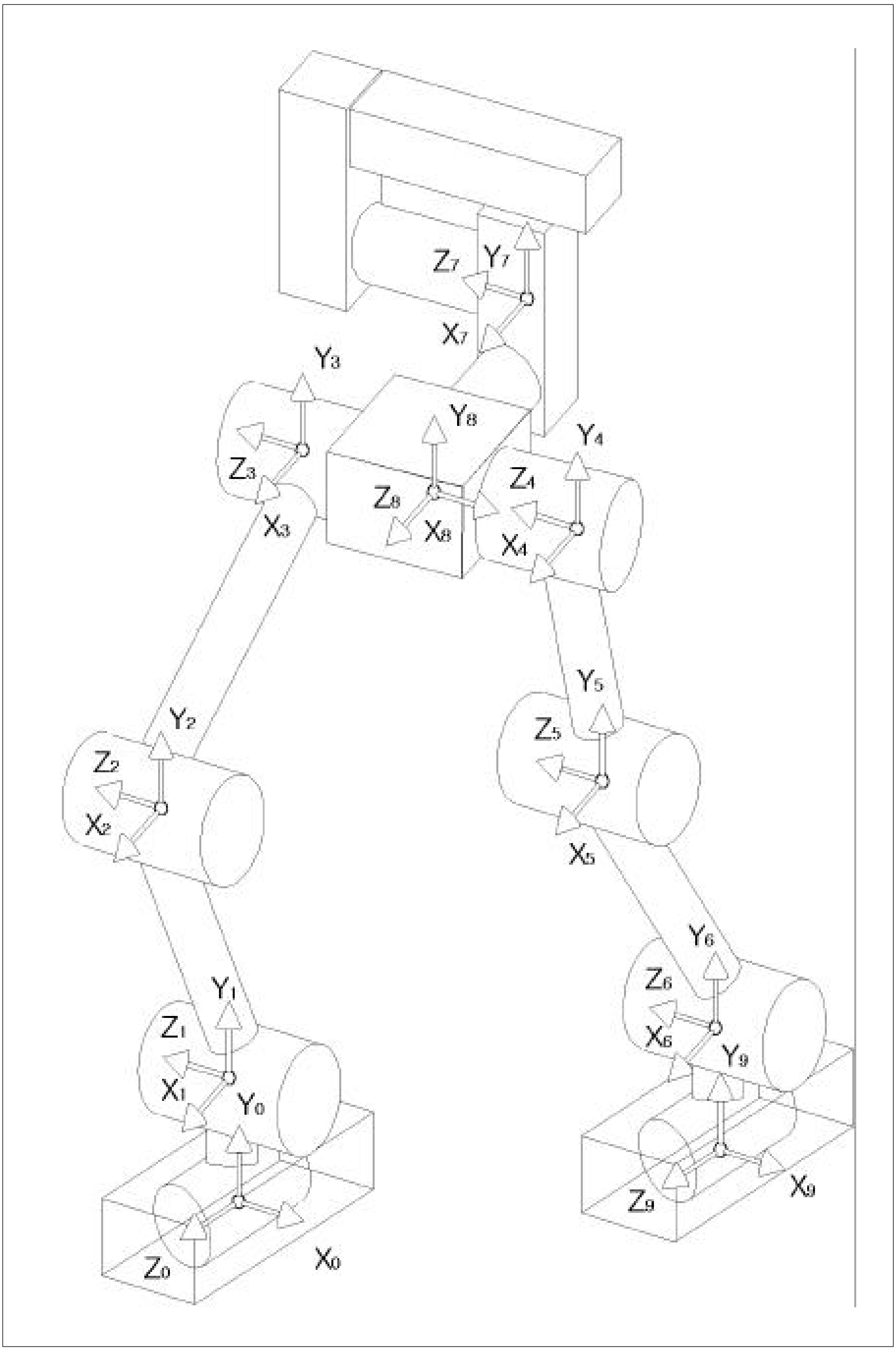


Fig 2.1 D-H Coordinates of The 10 D.O.F biped walking robot

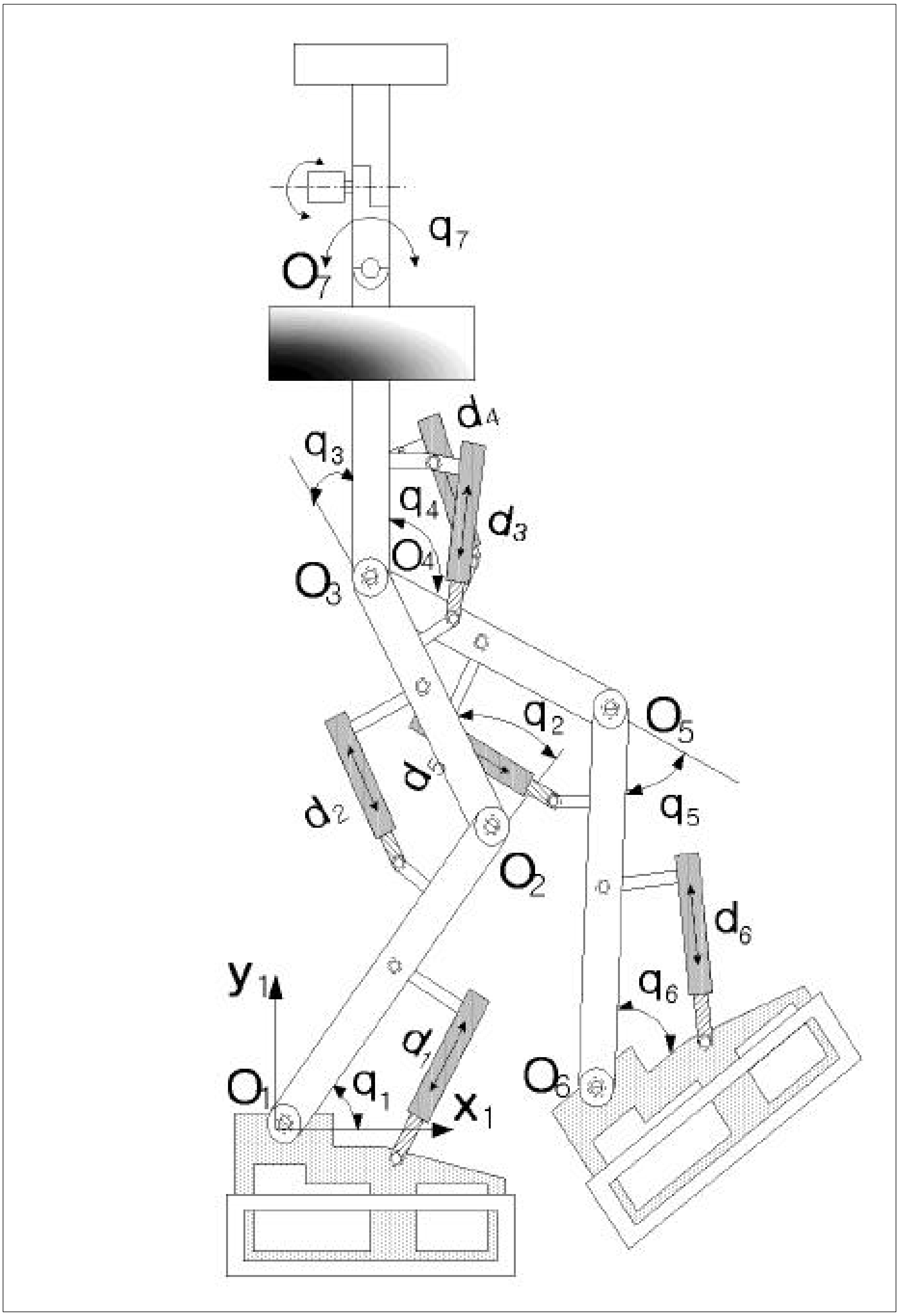


Fig 2.2 Kinematics model of Front walking

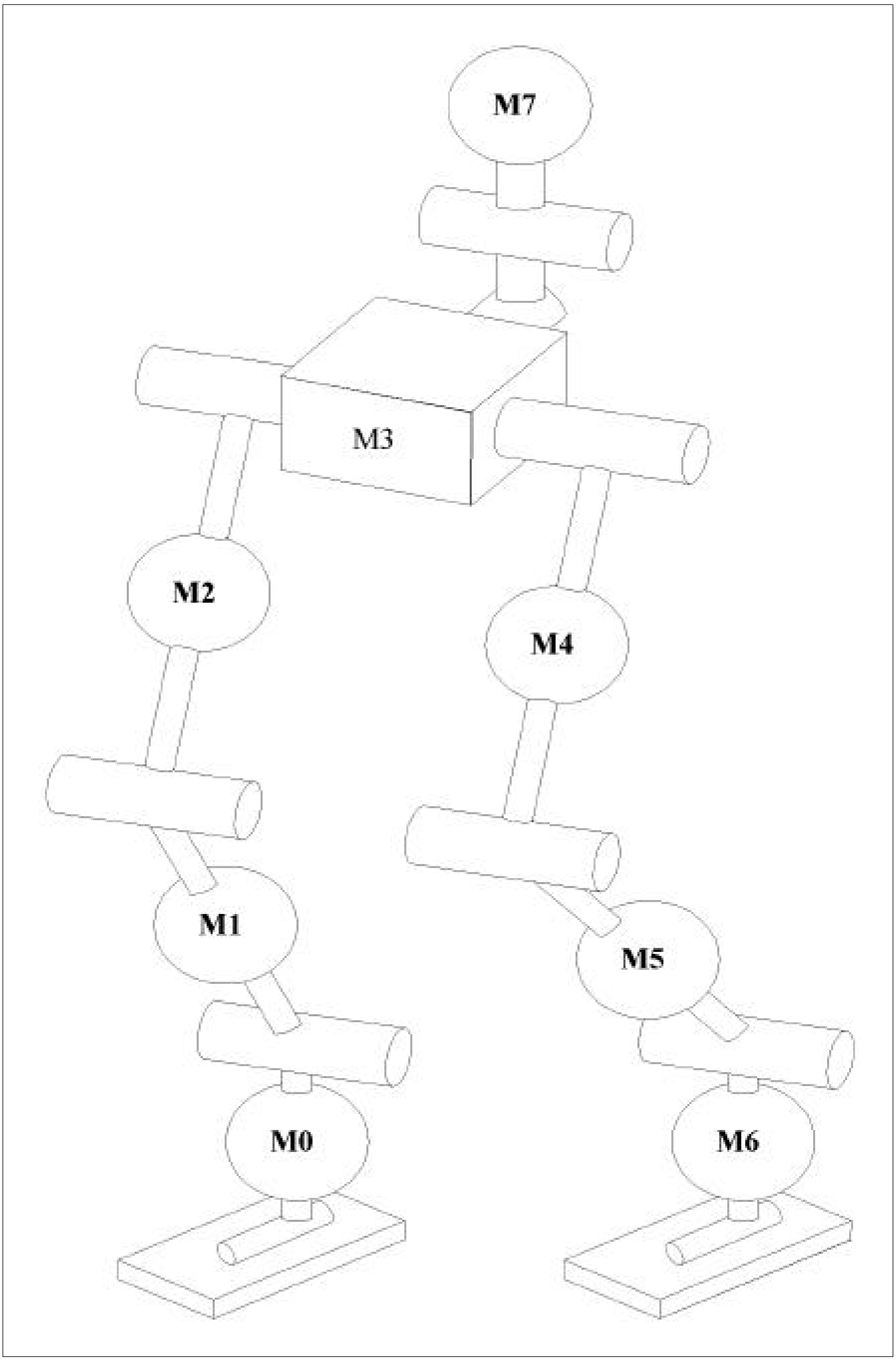


Fig 2.3 Mass model of The 10 D.O.F biped walking robot

Principle of least action) 및 가상 변위(Virtual displacement)에 의한 유도 방법이 있으며 여기서는 가상 변위에 기초한다. 각각의 좌표가 $r_1, \ldots r_k$인 k개의 질점으로 이루어진 시스템에서 만약, 이 질점들이 아무런 제한 없이 자유롭게 움직일 수 있다면, 각 질점의 운동량의 시간변화율은 그 질점에 작용하는 외력과 같다. 그러나 질점들의 운동이 어떤 모습으로든 제약을 받는다면, 외력 뿐만 아니라 구속이 유지되게 하는 구속력을 고려해야 할 것이다.

k개의 좌표들 $r_1, \ldots r_k$ 에서 구속조건이 다음의 등호 꼴을 가지면,

$$g_i(r_1, \ldots r_k) = 0, \quad i = 1, \ldots, l \tag{2.1}$$

홀로노믹(Holonomic)이라 하고, 그렇지 않으면 비홀로노믹(Nonholonomic)이라 한다. 시스템이 l 개의 홀로노믹 구속조건 아래 있으면 비구속 시스템보다 l 개만큼 적은 자유도를 가지는 구속 시스템으로 생각할 수 있다. 이때 시스템은 k개의 질점들의 좌표를 n개의 일반화 좌표(Generalized coordinates)인 $q_1, \ldots, q_n$ 로 나타낼 수 있다. 즉, 구속 조건 식 (2.1)의 여러 질점들의 좌표는,

$$r_i = r_i(q_1, \ldots, q_n), \quad i = 1, \ldots, k \tag{2.2}$$

의 형태로 나타낼 수 있다고 가정한다. 이때 $q_1, \ldots, q_n$ 는 독립적(Independent)이다. 일반화 좌표의 개념은 무한히 많은 질점들이 있을 때도 쓰일 수 있다. 그러나 간단히 하기 위해서 질점 수가 유한하다고 가정한다. 통상적인 일반화 좌표는 위치, 각도 등이 되며 실제 이족보행로봇에 있어서의 관절 변수를 $q_1, \ldots, q_n$ 으로 나타내게 하였다. 구속조건과 일치하는 무한소 변위 $\delta q_1, \ldots, \delta q_k$ 로 구성되는 가상 변위에 있어서 요구하는 구속조건 식(2.2)을 만족시키기 위해서는 모든 가상 변위의 집합은,

$$\delta r_i = \sum_{j=1}^{n} \frac{\Delta r_i}{\Delta q_i} \delta q_i, \quad i = 1, \ldots, k \tag{2.3}$$

가 되고, 이때 일반화 좌표의 가상 변위 $\delta q_1, \ldots, \delta q_k$ 는 구속되지 않는다.

또 다른 가정으로 각 질점이 평형 상태라고 가정하면 평형상태(Equilibrium)의 구속 시스템을 설명할 수 있다. 평형 상태의 경우에서 각 질점의 합력은 0 이 되고, 이는 각 가상 위치의 집합에 의한 일은 0 임을 뜻한다. 따라서 가상 변위의 어떤 집합에 의한 일의 합도 0 이다. 따라서,

$$\sum_{i=1}^{k} P_i^T \delta r_i = 0 \qquad (2.4)$$

여기서 P_i 는 질점 i 에 작용하는 총 힘이다. 다시 말해서 힘 F_i 는 외력 f_i 와, 구속력 $P_i^{(a)}$의 합이다. 가상 변위의 어떤 집합에 해당되는 구속력에 의한 한 일의 총합은 0, 즉

$$\sum_{i=1}^{k} (f_i^{(a)})^T \delta r_i = 0 \qquad (2.5)$$

이라고 가정한자면, 이는 질점 한 쌍 사이의 구속력의 방향이 두 질점을 잇는 반지름 벡터 상에 있을 때마다 성립 될 것이다. 식 (2.5)를 식 (2.4)에 대입하면 그 결과는

$$\sum_{i=1}^{k} f_i^T \delta r_i = 0 \qquad (2.6)$$

이 된다. 이 방정식의 좋은 점은 모르는 구속력을 포함하지 않고, 알려진 외력만 가진다는 점이다. 이 방정식은 가상일 원리를 나타내는 식으로서, 어떤 가상 변위의 집합에 해당되는 외력에 의한 일은 0 이다. 이 원리는 일반적으로 적용되는 것은 아니고 구속력이 일을 하지 않을 때인, 즉 식(2.5)가 성립될 때만 적용되는 것이다. 따라서 가상일 원리를 쓰면 구속력을 구하지 않고 시스템의 동역학 문제를 해결할 수 있다. 즉, 가상일의 원리는 강성이 유일한 구속조건일 경우에 적용된다. 그러나 식 (2.6)에서 가상변위 δr_i 는 독립 적이지 않으므로 이 방정식에서 각 계수 f_i 가 개별적으로 0 이라고 할 수 없다. 이러한 가정을 만족하기 위해서는 일반화 좌표로 변

환되어야 한다. 이러한 일반화 형태로의 변환 이전에 평형이 아닌 시스템을 생각한다면, 그런 시스템에서의 D'Alembert의 원리는 다음과 같다.

각 i 에 대해 질점 i 에 운동량인 허구의 추가력 $-\dot{p}_i$ 를 도입하면, 각 질점은 평형 상태에 있을 것이다. 따라서 식 (2. 4)의 P_i 를 $P_i - \dot{p}_i$ 로 바꾸면 결과식은 임의의 시스템에 대해서도 유효하다. 그러면 가상일 원리를 써서 전처럼 구속력을 없앨 수 있다 그 결과 식은 다음과 같다.

$$\sum_{i=1}^{k} f_i^T \delta r_i - \sum_{i=1}^{k} \dot{p}_i^T \delta r_i = 0 \tag{2. 7}$$

좌변의 첫째 항은 외력에 가상 일이고 두 번째 항은 운동량에 의한 것이다. 윗 식은 δr_i 의 각 계수가 0 이라는 것을 뜻하지 않는다. 이 목적으로 각 δr_i 를 식 (2. 3)에서 처럼 일반화 좌표의 해당 가상 변위로 나타낸다. 그러면 힘 f_i 에 대한 가상일은 다음과 같다.

$$\sum_{i=1}^{k} f_i^T \delta r_i = \sum_{i=1}^{k}\sum_{j=1}^{n} f_i^T \frac{\Delta r_i}{\Delta q_j} \delta q_j = \sum_{j=1}^{n} \Gamma_j \delta q_j \tag{2. 8}$$

여기서,

$$\Gamma_j = \sum_{i=1}^{k} f_i^T \frac{\Delta r_i}{\Delta q_j} \tag{2. 9}$$

식(2. 9)는 일반화 힘(Generalized force)이다. q_j 가 길이의 차원을 가질 필요가 없듯이, Γ_j 는 힘의 차원을 가질 필요가 없다. 그러나 $\Gamma_j \delta q_j$ 는 항상 일의 차원을 가져야만 한다. 다음으로 식 (2. 7)의 두 번째 항을 고려할 때 $p_i = m_i \dot{r}_i$ 이며,

$$\sum_{i=1}^{k} \dot{p}_i^T \delta r_i = \sum_{i=1}^{k} m_i \ddot{r}_i^T \delta r_i = \sum_{i=1}^{k}\sum_{j=1}^{n} m_i \ddot{r}_i^T \frac{\Delta r_i}{\Delta q_j} \delta q_j \tag{2. 10}$$

다음으로 미분의 곱 법칙을 쓰면

$$\sum_{j=1}^{n} m_i \ddot{r}_i^T \frac{\Delta r_i}{\Delta q_j} = \sum_{i=1}^{k} \left\{ \frac{d}{dt}[m_i \dot{r}_i^T \frac{\Delta r_i}{\Delta q_j}] - m_i \dot{r}_i^T \frac{d}{dt}[\frac{\Delta r_i}{\Delta q_j}] \right\} \quad (2.\ 11)$$

연쇄 규칙을 써서 식 (2. 2)**를 미분하면**

$$v_i = \dot{r}_i = \sum_{j=1}^{n} \frac{\Delta r_i}{\Delta q_j} \dot{q}_j \quad (2.\ 12)$$

여기서,

$$\frac{\Delta v_i}{\Delta \dot{q}_j} = \frac{\Delta r_i}{\Delta q_j}, \quad \frac{d}{dt}[\frac{\Delta r_i}{\Delta q_j}] = \sum_{i=1}^{n} \frac{\Delta^2 r_i}{\Delta q_j \Delta q_i} \dot{q}_i = \frac{\Delta v_i}{\Delta qj} \quad (2.\ 13)$$

식 (2. 13) **및** (2. 12)**를 식** (2. 11)**에 대입하면**

$$\sum_{j=1}^{n} m_i \ddot{r}_i^T \frac{\Delta r_i}{\Delta q_j} = \sum_{i=1}^{k} \left\{ \frac{d}{dt}[m_i v_i^T \frac{\Delta v_i}{\Delta q_j}] - m_i v_i^T \frac{d}{dt}[\frac{\Delta v_i}{\Delta q_j}] \right\} \quad (2.\ 14)$$

일반적인 운동에너지 K **는**

$$K = \sum_{i=1}^{k} \frac{1}{2} m_i v_i^T v_i \quad (2.\ 15)$$

으로 표현되고, 따라서 위의 합은 간결하게 나타낼 수 있다.

$$\sum_{j=1}^{n} m_i \ddot{r}_i^T \frac{\Delta r_i}{\Delta q_j} = \frac{d}{dt} \frac{\Delta K}{\Delta \dot{q}_j} - \frac{\Delta K}{\Delta q_j} \quad (2.\ 16)$$

식 (2. 16)**를 식** (2. 10)**에 대입하면 식** (2. 7)**의 두번째 합은**

$$\sum_{i=1}^{k} \dot{p}_i^T \delta r_i = \sum_{i=1}^{k} \left\{ \frac{d}{dt} \frac{\Delta K}{\Delta \dot{q}_j} - \frac{\Delta K}{\Delta q_j} \right\} \delta q_j \quad (2.\ 17)$$

마지막으로 식 (2. 7) 과 식(2. 8)을 묶으면

$$\sum_{i=1}^{k}\left\{\frac{d}{dt}\frac{\Delta K}{\Delta \dot{q}_j} - \frac{\Delta K}{\Delta q_j} - \Psi_j\right\}\delta q_j = 0 \tag{2. 18}$$

가상 변위 δq_j 들은 독립 적이므로 식 (2. 18)의 계수가 0 임을 결론 지을 수 있다.

$$\frac{d}{dt}\frac{\Delta K}{\Delta \dot{q}_j} - \frac{\Delta K}{\Delta q_j} = \Gamma_j, \quad j = 1, \ldots, n \tag{2. 19}$$

일반화 힘 Γ_j 가 외력과 퍼텐셜장(Potential field)에 의한 힘의 합이라면 아래와 같다.

$$\Gamma_j = -\frac{\Delta V}{\Delta q_j} + \tau_j \tag{2. 20}$$

윗 식을 만족하는 함수 τ_j 와 $V(q)$가 있다고 한다면, 식 (2. 19)는 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{d}{dt}\frac{\Delta L}{\Delta \dot{q}_j} - \frac{\Delta L}{\Delta q_j} = \tau_j \tag{2. 21}$$

위의 식을 Euler-Lagrange 방정식이라고 하며, 여기서 $L = K - V$ 는 Lagrangian이다. 또한 함수 V 는 위치에너지이다.

2.2 로봇 매니퓰레이터의 Lagrangian

위의 과정에서 시스템의 운동 에너지와 위치 에너지의 차이인 Lagrangian을 구하면 물체의 Euler-Lagrange 방정식을 유도할 수 있다. 실질적으로 로봇 매니퓰레이터에 적용하기 위하여 강체의 운동에너지와 위치에너지의 수식에 대한 유도 과정이 필요하

다. 우선 어떤 물체의 운동에너지는 물체의 전 질량을 질량중심에 모아서 얻어지는 병진 에너지와 질량중심 주위의 물체의 회전 에너지의 합이며, 물체의 위치에너지는 대상의 전 질량을 질량중심에 모았을 때 얻어지는 에너지와 같다. 이와 같이 매니퓰레이터 각 링크의 운동에너지와 위치에너지의 합이 전체 매니퓰레이터의 합이 된다. 질점들의 연속체로 이루어진 물체를 가정할 때, 이 물체의 질량의 밀도를 ρ로 나타내고, 물체 자체의 범위를 B 로 나타낸다면,

$$\int_B \rho(x,y,z)\,dx\,dy\,dz = m \tag{2.22}$$

위와 같고 이 때의 m 은 물체의 질량이다. 물체의 운동에너지는

$$\begin{aligned} K &= \frac{1}{2}\int_B v^T(x,y,z)\,v(x,y,z)\,\rho(x,y,z)\,dx\,dy\,dz \\ &= \frac{1}{2}\int_B v^T(x,y,z)\,v(x,y,z)\,dm \end{aligned} \tag{2.23}$$

으로 주어지고, 여기서 dm 은 좌표 (x,y,z) 에 있는 질점의 무한소질량을 나타낸다. 물체가 3차원 공간에서 어떤 운동을 하려면, 물체의 여러 다른 부위는 각기 다른 속도로 움직일 것이고, 이를 위해 모든 양들을 물체의 질량중심에 따라 나타낸다면, 그때의 물체의 질량중심은 아래의 정의된 좌표 $(x_c,\ y_c,\ z_c)$와 같이 나타내어진다.

$$x_c = \frac{1}{m}\int_B x\,dm, \quad y_c = \frac{1}{m}\int_B y\,dm, \quad z_c = \frac{1}{m}\int_B z\,dm$$

이 식은 더욱 간결하게 표현될 수 있다. r_c 가 질량중심의 3차원 좌표벡터를 나타내고 r 이 물체상의 좌표벡터를 나타낸다고 한다면 그때의 r_c 는 아래와 같다.

$$r_c = \frac{1}{m}\int_B r\,dm \tag{2.24}$$

질량중심을 원점으로 하는 좌표축을 질량중심에 단단하게 붙였다고 가정한다면, 물체

가 움직이면 물체 위의 한 점의 속도는

$$v = v_c + \omega \times r \quad (2.25)$$

윗 식은 관성 좌표계로 나타낸 질점의 속도 식이 된다. 그러나 이 식을 사용하여 같은 벡터를 운동 좌표계로 나타내어 계산할 수 있다. 변환은 벡터의 회전행렬을 곱해서 이루어진다. R 이 자유벡터를 운동 좌표 계에서 관성 좌표계로 변환하는 행렬이라고 하고, 그 때의 r 에 위치하는 질점의 속도를 왜대칭 행렬을 사용하여 운동 좌표계로 표현하면 다음과 같다.

$$R^T(v_c + \omega \times r) = R^T v_c + (R^T\omega) \times (R^T r) \quad (2.26)$$

식 (2.23)에서 운동에너지를 계산할 때 속도벡터는 어떤 좌표계로 나타내어도 동일하다. 이 점에서 식(2.25)의 모든 양을 강체에 부착된 운동 좌표계로 나타낼 수 있다. 따라서 벡터의 외적을 아래의 식처럼 벡터의 곱으로 나타낼 수 있다.

$$v = v_c + S(\omega) r \quad (2.27)$$

여기서 $S(\omega)$ 는 왜대칭 행렬이다. 식 (2.27)을 식 (2.23)에 대입하면 운동에너지는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$K = \frac{1}{2}\int_B [v_c + S(\omega) r]^T [v_c + S(\omega) r]\, dm \quad (2.28)$$

적분 안의 곱을 풀어쓰면 4개의 항이 된다. 그 중에서 2,3의 항은 상쇄되고 1,4항만 남게 된다. 그중 첫 번째 항은 다음과 같다.

$$K = \frac{1}{2}\int_B v_c^T v_c\, dm = \frac{1}{2} m\, v_c^T v_c \quad (2.29)$$

K 는 속도 v_c 로 움직이는 질량 m 의 운동에너지로서 운동에너지의 병진부(Translat

-ional part)라 불린다. 두 번째 및 세 번째 항은 질량중심이 좌표 계의 원점에 있음을 상기할 때 0 이 된다. 마지막 항은

$$K_4 =: \frac{1}{2}\int_B r^T S^T(\omega)\, S(\omega)\, r\, dm$$

윗 식에서 대각합 (Tr)을 사용하면,

$$K_4 = \frac{1}{2}\int_B Tr\, S(\omega) r r^T S^T(\omega)\, dm = \frac{1}{2} Tr\, S(\omega) J S^T(\omega) \qquad (2.30)$$

여기서, $J = \int_B r r^T\, dm$

으로 정의되는 3 × 3 행렬이다. 윗 식에서 왜대칭 행렬 $S(\omega)$ 을 풀어서 식 (2. 30)에 대입하고 세 행렬의 곱의 대각합을 계산하면 다음의 결과를 얻는다.

$$K_4 = \frac{1}{2}\omega^T I \omega \qquad (2.31)$$

여기서 I 는 3 × 3 관성행렬이다. 식 (2. 31)은 운동에너지의 회전부(Rotation part) 이다. 따라서 물체의 전체 운동에너지는 다음과 같이 주어진다.

$$K = \frac{1}{2} m v_c^T v_c + \frac{1}{2}\omega^T I \omega \qquad (2.32)$$

윗 식에서 첫 번째 항은 질량중심에 위치한 질량 m 의 운동에너지이다. 물체가 회전운동을 하지 않을 때 이것이 운동에너지의 전부가 될 것이다. 두 번째 항은 물체가 병진운동 뿐 만 아니라, 회전운동을 할 때 생기는 추가적 수정 항으로 중심을 벗어난 물체의 다른 부위들이 다른 속도로 움직인다는 사실을 설명한다. 여러 벡터들이 나타내어진 좌표계에 대해서 설명한다면, 우선 첫 번째 항 $v_c^T v_c$ 는 벡터 v_c 의 길이의 제곱이다. 좌표계가 바뀌면 단순히 회전 행렬을 곱하면 되고, 길이는 바뀌지 않으므

로 곱은 벡터가 나타내어진 좌표계에 무관하다. 다음으로 운동에너지의 회전 부를 생각한다면, 이 때 어떤 좌표계에서 ω 와 관성행렬 I 를 계산했는가가 문제가 된다. 그러나 삼중곱(Triple product) $\omega^T I \omega$ 는 모든 좌표계에서 동일하다. 물체에 좌표계를 부착하면 관성행렬 I 는 물체의 운동과 무관하므로 이 좌표 계로 계산한다. 이 때 각속도를 같은 좌표계로 계산할 필요가 있다.

ω_0가 관성 좌표 계에서 나타낸 물체의 각속도라면 $R^T \omega_0$는 자신의 좌표계로 나타낸 대상물의 각속도이다. 이때 R 은 물체 좌표계의 벡터를 관성 좌표계로 바꾸는 회전 행렬이다. n 링크로 이루어진 매니퓰레이터에 관해서 위에서 유도되어진 식들을 대입할 수 있다. 링크 상의 임의의 점의 선속도와 각속도는 간단히 자코비안 행렬과 관절변수의 미분으로 나타낼 수 있다. 적절한 자코비안 행렬 $J_{v_c i}$ 와 $J_{\omega i}$ 에 대해서

$$v_{ci} = J_{v_c i}(q)\,\dot{q}, \qquad \omega_i = R_i^T(q)\, J_{\omega i}(q)\,\dot{q}$$

이고, 여기서 추가적인 행렬 $R_i^T(q)$ 는 각속도가 링크에 부착된 좌표계로 표현되었음을 나타낸다. 링크 i 의 질량이 m_i 이고, 좌표계 i 에 나란한, 그러나 원점이 질량중심에 있는 좌표계를 중심으로 계산된 링크 i 의 관성행렬이 I_i 라고 한다면 식(2.32)에서 매니퓰레이터의 총 운동에너지는,

$$K = \frac{1}{2}\dot{q}^T \sum_{i=0}^{n} \left[m_i J_{vci}(q)^T J_{vci}(q) + J_{\omega i}(q)^T R_i(q) I_i R_i(q)^T J_{\omega i}(q) \right] \dot{q} \quad (2.33)$$

이 된다. 다시 말하면 매니퓰레이터의 운동에너지는 다음과 같은 형태가 된다.

$$K = \frac{1}{2}\dot{q}^T D(q)\,\dot{q} \quad (2.34)$$

여기서 $D(q)$ 는 통상 형상에 좌우되는 대칭인 양의 한정(Symmetric positive definite)행렬인 관성행렬이다. 다음으로 위치에너지 항을 고려한다면, 강체 동역학의 경우 하나뿐인 위치에너지 원은 중력이다. 벡터 g 가 기준 좌표계로 나타낸 중력

벡터라고 정의한다. 그러면 물체의 r 에 있는 무한소 질점의 위치에너지는 $g^T r\,dm$ 이다. 따라서 총 위치 에너지는 아래와 같다.

$$V = \int_B g^T r\,dm = g^T \int_B r\,dm = g^T r_c m \tag{2.35}$$

식 (2. 33) 및 식 (2. 25)에서 유도된 바와 같이 운동에너지는 다음과 같이 벡터 $\dot{q}$ 의 2차 함수(Quadratic function) 형태이다.

$$K = \frac{1}{2}\sum_{i,j}^{n} d_{ij}(q)\,\dot{q}_i\,\dot{q}_j := \frac{1}{2}\,\dot{q}^T D(q)\,\dot{q} \tag{2.36}$$

여기서 $n \times n$ 관성행렬 $D(q)$ 는 $q \in R^n$ 일 때 대칭이고 양의 한정이다. 이런 시스템의 Euler-Lagrange 방정식은 다음과 같이 이끌어 낼 수 있다.

$$L = K - V = \frac{1}{2}\sum_{i,j} d_{ij}(q)\,\dot{q}_i\,\dot{q}_j - V(q) \tag{2.37}$$

$$\frac{\Delta L}{\Delta \dot{q}_k} = \sum_j d_{kj}(q)\,\dot{q}_j\ ,\quad \frac{d}{dt}\frac{\Delta L}{\Delta \dot{q}_k} = \sum_j d_{kj}(q)\,\ddot{q}_j + \sum_j \frac{d}{dt} d_{kj}(q)\,\dot{q}_j \tag{2.38}$$
$$= \sum_j d_{kj}(q)\,\ddot{q}_j + \sum_j \frac{\Delta d_{kj}}{\Delta q_i} q_i q_j$$

이때, $$\frac{\Delta L}{\Delta q_k} = \frac{1}{2}\sum_{i,j}\frac{\Delta d_{ij}}{\Delta q_k}\,\dot{q}_i\,\dot{q}_j - \frac{\Delta V}{\Delta q_k} \tag{2.39}$$

따라서, Euler-Lagrange 방정식을 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\sum_j d_{kj}(q)\,\ddot{q}_j + \sum_{i,j}\left\{\frac{\Delta d_{kj}}{\Delta q_i} - \frac{1}{2}\frac{\Delta d_{ij}}{\Delta q_k}\right\}\dot{q}_i\,\dot{q}_j + \frac{\Delta V}{\Delta q_k} = \tau_k \tag{2.40}$$

합의 순서를 바꾸고 대칭성을 이용하면 다음과 같이 된다.

$$\sum_{i,j}\left\{\frac{\Delta d_{kj}}{\Delta q_i}\right\}\dot{q}_i\dot{q}_j = \frac{1}{2}\sum_{i,j}\left\{\frac{\Delta d_{kj}}{\Delta q_i} + \frac{\Delta d_{ki}}{\Delta q_j}\right\}\dot{q}_i\dot{q}_j \tag{2.41}$$

따라서,

$$\sum_{i,j}\left\{\frac{\Delta d_{kj}}{\Delta q_i} - \frac{1}{2}\frac{\Delta d_{ij}}{\Delta q_k}\right\}\dot{q}_i\dot{q}_j = \frac{1}{2}\sum_{i,j}\left\{\frac{\Delta d_{kj}}{\Delta q_i} + \frac{\Delta d_{ki}}{\Delta q_j} - \frac{\Delta d_{ij}}{\Delta q_k}\right\}\dot{q}_i\dot{q}_j \tag{2.42}$$

우측의 식을 Christoffel 기호라 한다. 고정된 k 에 대하여 $c_{ijk} = c_{jik}$ 의 형태를 가진다. 마지막으로 위치에너지 항인

$$\Phi_k = \frac{\Delta V}{\Delta q_k} \tag{2.43}$$

를 정의하면 Euler-Lagrange 방정식을 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\sum_j d_{kj}(q)\ddot{q}_j + \sum_{i,j} c_{ijk}(q)\dot{q}_i\dot{q}_j + \Phi_k(q) = \tau_k, \quad k = 1, \ldots, n \tag{2.44}$$

윗 식에는 세 종류의 항이 있다. 첫 번째 항은 일반화 좌표의 2차 미분을 포함한다. 두 번째 항은 계수가 q 에 좌우될 수 있는 q 의 1차 미분의 2차 항들이다. 이 항들은 다음의 두 종류로 구분될 수 있다. 곱의 꼴 $\dot{q}_i^2$ 을 가지는 원심력(Centrifugal) 항과 $i \neq j$ 일 때 곱의 꼴 $\dot{q}_i\dot{q}_j$ 을 가지는 Coriolis 항이다. 세 번째 항은 q 만 가지고 미분 꼴을 가지지 않는 항으로서 위치에너지를 미분하여 구해지는 항이다. 식(2.44)를 간략하게 표현하면 다음과 같다.

$$D(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + \Phi(q) = \tau \tag{2.45}$$

이때 위의 행렬 $C(q, \dot{q})$ 의 k, j 번째 요소는 아래와 같이 정의된다.

$$c_{kj} = \sum_{i=1}^{n} c_{ijk}(q)\,\dot{q}_i = \sum_{i=1}^{n} \frac{1}{2}\left\{\frac{\Delta d_{kj}}{\Delta q_i} + \frac{\Delta d_{ki}}{\Delta q_j} - \frac{\Delta d_{ij}}{\Delta q_k}\right\}\dot{q}_i$$

2.3 회전관절 공간의 동역학 모델링

이족 보행로봇을 구성하는 다리는 Fig 2.1 및 2.2 에 나타난 바와 같이 기본적으로 발목, 무릎 및 힙의 회전관절로 구성되어 있는 일반적인 3자유도 산업용 스칼라 로봇 매니퓰레이터와 같은 연쇄적인 구조이다. 전방보행에 대하여 균형관절을 포함한 7 자유도 형태에 대하여 지지부 발목의 기저 좌표계에 대한 이족보행로봇의 동역학적 모델링 및 운동 방정식을 구하기 위한 각 링크의 기구학적 위치는 아래와 같다.

$$M_{X_1} = l_{c1}\cos q_1$$
$$M_{Y_1} = l_{c1}\sin q_1$$

$$M_{X_2} = l_1\cos q_1 + l_{c2}\cos q_{12}$$
$$M_{Y_2} = l_1\sin q_1 + l_{c2}\sin q_{12}$$

$$M_{X_3} = l_1\cos q_1 + l_2\cos q_{12} + l_{c3}\cos q_{123}$$
$$M_{Y_3} = l_1\sin q_1 + l_2\sin q_{12} + l_{c3}\sin q_{123}$$

$$M_{X_4} = l_1\cos q_1 + l_2\cos q_{12} + l_{c4}\cos q_{1234}$$
$$M_{Y_4} = l_1\sin q_1 + l_2\sin q_{12} + l_{c4}\sin q_{1234}$$

$$M_{X_5} = l_1\cos q_1 + l_2\cos q_{12} + l_3\cos q_{123} + l_4\cos q_{1234} + l_{c5}\cos q_{12345}$$
$$M_{Y_5} = l_1\sin q_1 + l_2\sin q_{12} + l_3\sin q_{123} + l_4\sin q_{1234} + l_{c5}\sin q_{12345}$$

$$M_{X_6} = l_1\cos q_1 + l_2\cos q_{12} + l_3\cos q_{123} + l_4\cos q_{1234} + l_5\cos q_{12345} + l_{c6}\cos q_{123456}$$
$$M_{Y_6} = l_1\sin q_1 + l_2\sin q_{12} + l_3\sin q_{123} + l_4\sin q_{1234} + l_5\sin q_{12345} + l_{c6}\sin q_{123456}$$

$$M_{X_7} = l_1 \cos q_1 + l_2 \cos q_{12} + l_3 \cos q_{123} + l_{c7} \cos q_{1237}$$
$$M_{Y_7} = l_1 \sin q_1 + l_2 \sin q_{12} + l_3 \sin q_{123} + l_{c7} \sin q_{1237}$$

여기서, M_{X_i} , M_{Y_i}는 기저 좌표 계를 기준으로 한 각 링크 i 의 질량 중심으로서, 각 링크에 대해서 상대적인 위치로 표현되었고, $q_{1234567} = \sum_{i=1}^{7} q_i$ 을 의미한다. 다리는 지지부 및 운동부로 구분될 수 있다. 우선적으로 지지부 다리는 Fig 2.2 에서의 $O_1 \sim O_3$ 로서 이에 대한 파라미터는 다음과 같이 정의된다.

l_1: 발목에서 무릎까지의 길이

l_{c1}: 발목 좌표계(O_1)에서 l_1 상의 무게중심 거리

l_2: 무릎에서 힙까지의 길이

l_{c2}: 무릎 좌표계(O_2)에서 l_2상의 무게중심 거리

l_3: 힙에서 상부 균형 관절까지의 길이

l_{c3}: 힙 좌표계(O_3)에서 l_3의 무게중심 거리

다음으로 운동부 다리는 지지부의 골반(O_3)에서 Z 축으로 평행하게 운동부의 골반(O_4)으로 연결되어 있으며 $O_4 \sim O_6$ 가 이에 포함된다. 파라미터에 관하여,

l_4: 힙에서 무릎까지의 길이

l_{c4}: 힙 좌표계(O_4)에서 l_4상의 무게중심 거리

l_5: 무릎에서 발목까지의 길이

l_{c5}: 무릎 좌표계(O_5)에서 l_5 상의 무게중심 거리

l_{c6}: 발목 좌표계(O_5)에서 발꿈치 방향의 무게중심 거리

그리고 지지부 다리에서 연결된 상부 균형관절(O_7) 에 대한 파라미터에서,

l_{c7}: 상부 펜듀럼 좌표계(O_7)에서 상단방향의 무게중심 거리

2.3.1 자코비안의 유도

이족 로봇의 기구 메커니즘을 Denavit-Hartenberg 표시법을 사용하여 나타내면 다음과 같다.

$$T_0^n(q) = \begin{bmatrix} R_0^n(q) & d_0^n(q) \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad n = 1, \ldots, 7 \tag{2.46}$$

여기서, $q = (q_1, \ldots, q_7)^T$ 는 관절변수의 벡터이다. 말단장치 좌표계로부터 기저 좌표계로의 변환을 나타내면, 이족 로봇이 움직임에 따라 관절변수 q_i 와 말단장치 위치 벡터 d_0^n 와 방향 R_0^n 는 시간의 함수가 된다. 여러 개의 링크로 연결되어 있는 이족 로봇의 보행 시 각각의 링크는 각기 다른 선속도와 각속도를 가진다. 따라서 말단장치의 선속도와 각속도를 기저 좌표계에 대한 관절속도의 벡터 $\dot{q}(t)$ 와 연관지어야 한다.

X 및 Y 축에 대하여 각 링크의 위치를 d_0^n 로 표현한다면,

$$S(\omega_0^n) = \dot{R}_0^n (\dot{R}_0^n)^T \tag{2.47}$$

여기서 $S(\omega)$ 는 왜대칭 행렬이다. 위의 식이 각속도 벡터 ω_0^n 를 정의한다.

$$v_0^n = \dot{d}_0^n \tag{2.48}$$

위의 식이 말단장치의 선 속도를 나타내며, 다음의 관계를 구할 수 있다.

$$v_0^i = v_{ci} = J_{vci}(q)\dot{q}, \qquad \omega_0^i = J_{\omega i}(q)\dot{q}, \quad i = 1, \ldots, 7 \tag{2.49}$$

여기서 $J_{vci}, J_{\omega i} \in R^{3\times 7}$ 행렬로서 선속도 자코비안과 각속도 자코비안이다.

로봇의 관절은 전부 회전관절로 구성되어 있으므로 선속도 및 각속도를 포함하는 자

코비안은 아래와 같이 정의된다.

$$J_i = \begin{bmatrix} z_i \times (o_n - o_i) \\ z_i \end{bmatrix}, \quad i = 1, \ldots, 7 \qquad (2.50)$$

여기서 $z_i \times (o_n - o_i)$ 부분이 선속도 자코비안 이며, z_i 는 각속도 자코비안이다. 또한 앞서 지적했듯이 각속도는 각 링크에 부착된 좌표계로 나타낼 필요가 있다. Fig 2.1 에서 보는 바와 같이 이족로봇의 각 관절은 회전관절로만 구성되어있고 각 관절 좌표계의 Z 축들이 같은 방향이므로 각속도 자코비안은 아래와 같이 동일하다.

$$J_{\omega i} = [0\ 0\ 1]^T, \quad i = 1, \ldots, 7 \qquad (2.51)$$

위에서 나타내어진 인체형 10자유도 이족 보행로봇에 대한 각 링크의 질량중심길이를 각각의 관절 각으로 편 미분하여 구해진 선속도 자코비안은 아래와 같이 정의된다.

$$J_{vc1} = \begin{bmatrix} -l_{c1}S_{q1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ l_{c1}C_{q1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$J_{vc2} = \begin{bmatrix} -l_1S_{q1} - l_{c2}S_{q12} & -l_{c2}S_{q12} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ l_1C_{q1} + l_{c2}C_{q12} & l_{c2}C_{q12} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$J_{vc3} = \begin{bmatrix} -l_1S_{q1} - l_2S_{q12} - l_{c3}S_{q123} & -l_2S_{q12} - l_{c3}S_{q123} & -l_{c3}S_{q123} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ l_1C_{q1} + l_2C_{q12} + l_{c3}C_{q123} & l_2C_{q12} + l_{c3}C_{q123} & l_{c3}C_{q123} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

J_{vc4} 행렬에서 각 행은 다음과 같다.

$$J_{vc4}(1) = [\ -l_1S_{q1} - l_2S_{q12} - l_4S_{q1234},\ -l_2S_{q12} - l_4S_{q1234},\ -l_4S_{q1234},$$
$$-l_4S_{q1234} - l_{c5}S_{q12345},\ 0,\ 0,\ 0\ ]$$

$J_{vc4}(2) = [\ l_1 C_{q1} + l_2 C_{q12} + l_4 C_{q1234},\ l_2 C_{q12} + l_4 C_{q1234},\ l_4 C_{q1234},$

$l_4 C_{q1234} + l_{c5} C_{q12345},\ 0,\ 0,\ 0\ ]$

$J_{vc4}(3) = [\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ ]$

J_{vc5} **행렬에서 각 행은 다음과 같다.**

$J_{vc5}(1) = [\ -l_1 S_{q1} - l_2 S_{q12} - l_4 S_{q1234} - l_{c5} S_{q12345},\ -l_2 S_{q12} - l_4 S_{q1234} - l_{c5} S_{q12345},$

$-l_4 S_{q1234} - l_{c5} S_{q12345},\ -l_4 S_{q1234} - l_{c5} S_{q12345},\ -l_{c5} S_{q12345},\ 0,\ 0\ ]$

$J_{vc5}(2) = [\ l_1 C_{q1} + l_2 C_{q12} + l_4 C_{q1234} + l_{c5} C_{q12345},\ l_2 C_{q12} + l_4 C_{q1234} + l_{c5} C_{q12345},$

$l_4 C_{q1234} + l_{c5} C_{q12345},\ l_4 C_{q1234} + l_{c5} C_{q12345},\ l_{c5} C_{q12345},\ 0,\ 0\ ]$

$J_{vc5}(3) = [\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ ]$

J_{vc6} **행렬에서 각 행은 다음과 같다.**

$J_{vc6}(1) = [\ -l_1 S_{q1} - l_2 S_{q12} - l_4 S_{q1234} - l_5 S_{q12345} - l_{c6} S_{q123456},\ -l_2 S_{q12} - l_4 S_{q1234}$

$-l_5 S_{q12345} - l_{c6} S_{q123456},\ -l_4 S_{q1234} - l_5 S_{q12345} - l_{c6} S_{q123456},\ -l_4 S_{q1234}$

$-l_5 S_{q12345} - l_{c6} S_{q123456},\ -l_5 S_{q12345} - l_{c6} S_{q123456},\ -l_{c6} S_{q123456},\ 0\ ]$

$J_{vc6}(2) = [\ l_1 C_{q1} + l_2 C_{q12} + l_4 C_{q1234} + l_5 C_{q12345} + l_{c6} C_{q123456},\ l_2 C_{q12} + l_4 C_{q1234}$

$+ l_5 C_{q12345} + l_{c6} C_{q123456},\ l_4 C_{q1234} + l_5 C_{q12345} + l_{c6} C_{q123456},\ l_4 C_{q1234}$

$+ l_5 C_{q12345} + l_{c6} C_{q123456},\ l_5 C_{q12345} + l_{c6} C_{q123456},\ + l_{c6} C_{q123456},\ 0\ ]$

$J_{vc6}(3) = [\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ ]$

J_{vc7} **행렬에서 각 행은 다음과 같다.**

$J_{vc7}(1) = [\ -l_1 S_{q1} - l_2 S_{q12} - l_3 S_{q123} - l_{c7} S_{q1237},\ -l_2 S_{q12} - l_3 S_{q123} - l_{c7} S_{q1237},$

$-l_3 S_{q123} - l_{c7} S_{q1237},\ 0,\ 0,\ 0,\ -l_{c7} S_{q1237}\ ]$

$J_{vc7}(2) = [\ l_1 C_{q1} + l_2 C_{q12} + l_3 C_{q123} + l_{c7} C_{q1237},\ l_2 C_{q12} + l_3 C_{q123} + l_{c7} C_{q1237},$

$l_3 C_{q123} + l_{c7} C_{q1237},\ 0,\ 0,\ 0,\ l_{c7} C_{q1237}\ ]$

$J_{vc7}(3) = [\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ ]$

여기서, $C_{q1,...,7} = \sum_{i=1}^{7} \cos_{i}$, $S_{q1,...,7} = \sum_{i=1}^{7} \sin_{i}$ 을 의미한다.

2.3.2 관성행렬의 유도

이족보행로봇의 각 링크에 대한 선속도 및 각속도 자코비안을 위에 나타내었다. 동역학 방정식을 유도하기 위해서는 식 (2. 33)에 나타나 바와 같이 통상 형상에 좌우되는 대칭인 양의 한정행렬인 관성행렬 $D(q)$ 를 구해야 한다. 관성행렬의 구성요소 중에서 선속도를 포함하는 부분은 단지 질량과 선속도 자코비안의 이중곱으로 구성되지만, 각속도를 포함하는 부분에서는 각속도를 각 링크에 부착된 좌표계로 나타내어야 한다. 그러나 이족 로봇 관절구성은 전부 회전관절로 구성되어있으므로 모든 Z 축의 방향은 동일하다. 또한 ω_i 는 k 방향이므로 삼중곱 $\omega_i^T I_i \omega_i$, $i = 1,...,7$ 는 단순히 관성모멘트와 각속도 크기의 제곱임을 알 수 있다. 식(2. 33)의 내용에 따라 곱을 수행하고 $\cos^2\theta + \sin^2\theta = 1$, $\cos\alpha\cos\beta + \sin\alpha\sin\beta = \cos(\alpha - \beta)$ 을 쓰면, 전체 시스템에 있어서 관성행렬을 구할 수 있다.
단, 여기서는 관성행렬의 일부분인 지지부의 발목에 있어서 발목을 기준좌표로 상대적 관성행렬을 나타내었다.

$$
\begin{aligned}
D_{11} = & \; m_1 l_{c1} + m_2(l_1^2 + l_{c2}^2 + 2 l_1 l_{c2} C_{q2}) \\
& + m_3(l_1^2 + l_2^2 + l_{c3}^2 + 2 l_1 l_2 C_{q2} + 2 l_2 l_{c3} C_{q3} + 2 l_1 l_{c3} C_{q23}) \\
& + m_4(l_1^2 + l_2^2 + l_{c4}^2 + 2 l_1 l_2 C_{q2} + 2 l_1 l_{c4} C_{q234} + 2 l_2 l_{c4} C_{q34}) \\
& + m_5 \; (l_1^2 + l_2^2 + l_4^2 + l_{c5}^2 + 2 l_1 l_2 C_{q2} + 2 l_1 l_4 C_{q234} + 2 l_1 l_{c5} C_{q2345} \\
& \quad + 2 l_2 l_4 C_{q34} + 2 l_2 l_{c5} C_{q345} + 2 l_4 l_{c5} C_{q5}) \\
& + m_6 \; (l_1^2 + l_2^2 + l_4^2 + l_5^2 + l_{c6}^2 + 2 l_1 l_2 C_{q2} + 2 l_1 l_4 C_{q234} + 2 l_1 l_5 C_{q2345} \\
& \quad + 2 l_1 l_{c6} C_{q23456} + 2 l_2 l_4 C_{q345} + 2 l_2 l_5 C_{q345} + 2 l_2 l_{c6} C_{q3456} \\
& \quad + 2 l_4 l_5 C_{q5} + 2 l_4 l_{c6} C_{q56} + 2 l_5 l_{c6} C_{q6}) \\
& + m_7 \; (l_1^2 + l_2^2 + l_3^2 + l_{c7}^2 + 2 l_1 l_2 C_{q2} + 2 l_1 l_3 C_{q23} + 2 l_1 l_{c7} C_{q237} \\
& \quad + 2 l_2 l_3 C_{q3} + 2 l_2 l_{c7} C_{q37} + 2 l_3 l_{c7} C_{q7})
\end{aligned}
$$

$$+ I_1 + I_2 + I_3 + I_4 + I_5 + I_6 + I_7$$

$$D_{12} = m_2 (l_{c2}^2 + l_1 l_{c2} C_{q2}) + m_3 (l_2^2 + l_{c3}^2 + l_1 l_2 C_{q2} + l_1 l_{c3} C_{q23} + 2 l_2 l_{c3} C_{q3})$$
$$+ m_4 (l_2^2 + l_{c4}^2 + l_1 l_2 C_{q2} + l_1 l_{c4} C_{q234} + 2 l_2 l_{c4} C_{q34})$$
$$+ m_5 (l_2^2 + l_4^2 + l_{c5}^2 + l_1 l_2 C_{q2} + l_1 l_4 C_{q234} + l_1 l_{c5} C_{q2345}$$
$$+ 2 l_2 l_4 C_{q34} + 2 l_2 l_{c5} C_{q345} + 2 l_4 l_{c5} C_{q5})$$
$$+ m_6 (l_2^2 + l_4^2 + l_5^2 + l_{c6}^2 + l_1 l_2 C_{q2} + l_1 l_4 C_{q234} + l_1 l_5 C_{q2345}$$
$$+ l_1 l_{c6} C_{q23456} + 2 l_2 l_4 C_{q345} + 2 l_2 l_5 C_{q345} + 2 l_2 l_{c6} C_{q3456}$$
$$+ 2 l_4 l_5 C_{q5} + 2 l_4 l_{c6} C_{q56} + 2 l_5 l_{c6} C_{q6})$$
$$+ m_7 (l_2^2 + l_3^2 + l_{c7}^2 + l_1 l_2 C_{q2} + l_1 l_3 C_{q23} + l_1 l_{c7} C_{q237}$$
$$+ 2 l_2 l_3 C_{q3} + 2 l_2 l_{c7} C_{q37} + 2 l_3 l_{c7} C_{q7})$$
$$+ I_2 + I_3 + I_4 + I_5 + I_6 + I_7 = D_{21}$$

$$D_{13} = m_3 (l_{c3}^2 + l_1 l_{c3} C_{q23} + l_2 l_{c3} C_{q3}) + m_4 (l_{c4}^2 + l_1 l_{c4} C_{q234} + l_2 l_{c4} C_{q34})$$
$$+ m_5 (l_4^2 + l_{c5}^2 + l_1 l_4 C_{q234} + l_1 l_{c5} C_{q2345} + 2 l_2 l_4 C_{q34}$$
$$+ 2 l_2 l_{c5} C_{q345} + 2 l_4 l_{c5} C_{q5})$$
$$+ m_6 (l_4^2 + l_5^2 + l_{c6}^2 + l_1 l_4 C_{q234} + l_1 l_5 C_{q2345} + l_1 l_{c6} C_{q23456} + 2 l_2 l_4 C_{q345}$$
$$+ 2 l_2 l_5 C_{q345} + 2 l_2 l_{c6} C_{q3456} + 2 l_4 l_5 C_{q5} + 2 l_4 l_{c6} C_{q56} + 2 l_5 l_{c6} C_{q6})$$
$$+ m_7 (l_2^2 + l_3^2 + l_{c7}^2 + l_1 l_2 C_{q2} + l_1 l_3 C_{q23} + l_1 l_{c7} C_{q237} + l_2 l_3 C_{q3}$$
$$+ l_2 l_{c7} C_{q37} + 2 l_3 l_{c7} C_{q7})$$
$$+ I_3 + I_4 + I_5 + I_6 + I_7 = D_{31}$$

$$D_{14} = m_4 (l_{c4}^2 + l_1 l_{c4} C_{q234} + l_2 l_{c4} C_{q34})$$
$$+ m_5 (l_4^2 + l_{c5}^2 + l_1 l_4 C_{q234} + l_1 l_{c5} C_{q2345} + 2 l_2 l_4 C_{q34} + 2 l_2 l_{c5} C_{q345}$$
$$+ 2 l_4 l_{c5} C_{q5})$$

$$+ m_6(l_4^2 + l_5^2 + l_{c6}^2 + l_1 l_4 C_{q234} + l_1 l_5 C_{q2345} + l_1 l_{c6} C_{q23456} + 2 l_2 l_4 C_{q345}$$
$$+ 2 l_2 l_5 C_{q345} + 2 l_2 l_{c6} C_{q3456} + 2 l_4 l_5 C_{q5} + 2 l_4 l_{c6} C_{q56} + 2 l_5 l_{c6} C_{q6})$$
$$+ I_4 + I_5 + I_6 = D_{41}$$

$$D_{15} = m_5 (l_{c5}^2 + l_1 l_{c5} C_{q2345} + l_2 l_{c5} C_{q345} + l_4 l_{c5} C_{q5})$$
$$+ m_6 (l_5^2 + l_{c6}^2 + l_1 l_5 C_{q2345} + l_1 l_{c6} C_{q23456} + l_2 l_5 C_{q345} + l_2 l_{c6} C_{q3456}$$
$$+ l_4 l_5 C_{q5} + l_4 l_{c6} C_{q56} + 2 l_5 l_{c6} C_{q6}) + I_5 + I_6 = D_{51}$$

$$D_{16} = m_6 (l_{c6}^2 + l_1 l_{c6} C_{q23456} + l_2 l_{c6} C_{q3456} + l_4 l_{c6} C_{q56} + 2 l_5 l_{c6} C_{q6}) + I_6 = D_{61}$$

$$D_{17} = m_7 (l_{c7}^2 + l_1 l_{c7} C_{q237} + l_2 l_{c7} C_{q37} + l_3 l_{c7} C_{q7}) + I_7 = D_{71}$$

2.3.3 Christoffel항의 유도

Chrostoffel항은 식 (2. 42)에서 처럼 곱의 꼴 $\dot{q}_i^{\,2}$ 을 가지는 원심력(Centrifug-al) 항과 $i \neq j$ 일 때 곱의 꼴 $\dot{q}_i \dot{q}_j$ 을 가지는 Coriolis 항으로 구성되며 위에서 구해진 관성행렬 $D(q)$ 를 각 링크의 관절 각 q_i 로 편미분해서 구해진다. 다시 말하면 이족보행로봇이 움직일 경우 로봇을 구성하는 여러 링크부분이 서로 연결되어 같거나 혹은 다른 방향으로 운동할 때 발생되는 간섭력 항을 포함한다. 여기서는 지지부의 발목에 있어서 부분적인 Chrostoffel항을 나타내었다.

$$C_{111} = \frac{1}{2} \frac{\Delta D_{11}}{\Delta q_1} = 0$$

$$C_{121} = - m_2 l_1 l_{c2} S_{q2} - m_3 (l_1 l_2 S_{q2} + l_1 l_{c3} S_{q23}) - m_4 (l_1 l_2 S_{q2} + l_1 l_{c4} S_{q234})$$
$$- m_5 (l_1 l_2 S_{q2} + l_1 l_4 S_{q234} + l_1 l_{c5} S_{q2345})$$
$$- m_6 (l_1 l_2 S_{q2} + l_1 l_4 S_{q234} + l_1 l_5 S_{q2345} + l_1 l_{c6} S_{q23456})$$

$$- m_7(l_1 l_2 S_{q2} + l_1 l_3 S_{q23} + l_1 l_{c7} S_{q237}) = C_{211}$$

$$C_{131} = - m_3(l_1 l_{c3} S_{q23} + l_2 l_{c3} S_{q3}) - m_4(l_1 l_{c4} S_{q234} + l_2 l_{c4} S_{q34})$$
$$- m_5(l_1 l_4 S_{q234} + l_1 l_{c5} S_{q2345} + l_2 l_4 S_{q34} + l_2 l_{c5} S_{q345})$$
$$- m_6 (l_1 l_4 S_{q234} + l_1 l_5 S_{q2345} + l_1 l_{c6} S_{q23456} + l_2 l_4 S_{q34} + l_2 l_5 S_{q345}$$
$$+ l_2 l_{c6} S_{q3456})$$
$$- m_7(l_1 l_3 S_{q23} + l_1 l_{c7} S_{q37} + l_2 l_3 S_{q3} + l_2 l_{c7} S_{q37}) = C_{211}$$

$$C_{141} = - m_4(l_1 l_{c4} S_{q234} + l_2 l_{c4} S_{q34})$$
$$- m_5(l_1 l_4 S_{q234} + l_1 l_{c5} S_{q2345} + l_2 l_4 S_{q34} + l_2 l_{c5} S_{q345})$$
$$- m_6 (l_1 l_4 S_{q234} + l_1 l_5 S_{q2345} + l_1 l_{c6} S_{q23456} + l_2 l_4 S_{q34} + l_2 l_5 S_{q345}$$
$$+ l_2 l_{c6} S_{q3456}) = C_{411}$$

$$C_{151} = - m_5(l_1 l_{c5} S_{q2345} + l_2 l_{c5} S_{q345} + l_4 l_{c5} S_{q5})$$
$$- m_6 (l_1 l_5 S_{q2345} + l_1 l_{c6} S_{q23456} + l_1 l_{c6} S_{q23456} + l_2 l_5 S_{q345} + l_2 l_{c6} S_{q3456}$$
$$+ l_4 l_5 S_{q5} + l_4 l_{c6} S_{q56}) = C_{511}$$

$$C_{161} = - m_6 (l_1 l_{c6} S_{q23456} + l_2 l_{c6} S_{q3456} + l_4 l_{c6} S_{q56} + l_5 l_{c6} S_{q6}) = C_{611}$$

$$C_{171} = - m_7(l_1 l_{c73} S_{q237} + l_2 l_{c7} S_{q37} + l_3 l_{c7} S_{q7}) = C_{711}$$

2.3.4 위치 에너지

이 보행로봇의 전방 보행형태를 7**개의 링크로 연결된 매니퓰레이터로 가정한다면 매니퓰레이터의 위치에너지는 단순히** 7**개의 링크 위치에너지의 합이다. 각 링크에 대해서 위치에너지는 질량곱하기 중력가속도 곱하기 질량중심의 높이이다. 다시 말하면 물체의 총 위치에너지는 대상물의 전 질량이 질량중심에 모였을 때와 같다. 구해진 총 위치에너지를 각 링크의 관절변수에 대하여 식** (2. 43)**에서와 같이 편 미분하면**

Euler-Lagrange **방정식에 포함되는 위치에너지 항이 구해진다**. **구하여진 매니퓰레이터의 위치에너지는 벡터** q **에 좌우되고** $\dot{q}$ **에 좌우되지 않는다**. **구하여진 각 링크의 위치에너지는 다음과 같다**.

$$\Phi_1 = (m_1 g l_{c1} + m_2 g l_1 + m_3 + g l_4 + m_5 g l_1 + m_6 g l_1 + m_7 g l_1) C_{q1}$$
$$+ (m_2 g l_{c2} + m_3 g l_2 + m_4 g l_2 + m_5 g l_2 + m_6 g l_2 + m_7 g l_2) C_{q12}$$
$$+ (m_3 g l_{c3} + m_7 g l_{c7}) C_{q123} + (m_4 g l_{c4} + m_5 g l_4 + m_6 g l_5 + m_6 g l_6) C_{q1234}$$
$$+ (m_5 g l_{c5} + m_6 g l_5) C_{q12345} + m_6 g l_{c6} C_{q123456} + m_7 g l_{c7} C_{q1237}$$

$$\Phi_2 = (m_2 g l_{c2} + m_3 g l_2 + m_4 g l_2 + m_5 g l_2 + m_6 g l_2 + m_7 g l_2) C_{q12}$$
$$+ (m_3 g l_{c3} + m_7 g l_{c7}) C_{q123} + (m_4 g l_{c4} + m_5 g l_4 + m_6 g l_5 + m_6 g l_6) C_{q1234}$$
$$+ (m_5 g l_{c5} + m_6 g l_5) C_{q12345} + m_6 g l_{c6} C_{q123456} + m_7 g l_{c7} C_{q1237}$$

$$\Phi_3 = (m_3 g l_{c3} + m_7 g l_{c7}) Cq\,123 + (m_4 g l_{c4} + m_5 g l_4 + m_6 g l_5 + m_6 g l_6) C_{q1234}$$
$$+ (m_5 g l_{c5} + m_6 g l_5) C_{q12345} + m_6 g l_{c6} C_{q123456} + m_7 g l_{c7} C_{q1237}$$

$$\Phi_4 = (m_4 g l_{c4} + m_5 g l_4 + m_6 g l_5 + m_6 g l_6) C_{q1234} + (m_5 g l_{c5} + m_6 g l_5) C_{q12345}$$
$$+ m_6 g l_{c6} C_{q123456}$$

$$\Phi_5 = (m_5 g l_{c5} + m_6 g l_5) C_{q12345} + m_6 g l_{c6} C_{q123456}$$

$$\Phi_6 = m_6 g l_{c6} C_{q123456}$$

$$\Phi_7 = m_7 g l_{c7} C_{q1237}$$

2.3.5 Closed-Form 동역학 방정식

제안된 시스템에 대한 회전관절 공간의 동역학 방정식을 유도하기 위하여 전방보행에 대한 각 회전관절 부분의 제어입력인 Torque 입력 $\tau_1, \ldots, \tau_7$ 이 각 관절에 주어진다. 동역학 방정식은 Euler-Lagrange 방정식을 사용하였으며 앞서 유도되었던 관성행렬 및 Christoffel 기호와 위치에너지 항을 대입하면 Euler-Lagrange 방정식을 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\sum_j d_{kj}(q)\,\ddot{q}_j + \sum_{i,j} c_{ijk}(q)\,\dot{q}_i\,\dot{q}_j + \Phi_k(q) = \tau_k, \quad k = 1, \ldots, 7 \qquad (2.52)$$

윗 식의 첫 번째 항은 일반화 좌표의 2차 미분을 포함하는 양의 한정행렬인 관성행렬이다. 두 번째 항은 계수가 q 에 좌우될 수 있는 q 의 1차 미분의 2차 항들로서 원심력 및 Coriolis 항으로 구분된다. 이 부분은 다 관절의 로봇이 움직일 때 로봇을 구성하는 각 링크에 대한 다른 링크 부분의 간섭력 항을 포함한다. 세 번째 항은 q 만 가지고 미분 꼴을 가지지 않는 항으로서 위치에너지를 미분하여 구해지는 항이다. 이 항은 토크 입력이 없을 경우 이족 보행로봇에 작용하는 유일한 외력으로 간주된다. 위의 7 자유도에 관한 Euler-Lagrange 방정식에 대해 관성행렬을 이용하여 표현하면 다음과 같다.

$$D(q)\,\ddot{q} + C(q, \dot{q})\,\dot{q} + \Phi(q) = \tau$$

여기서, $D(q) \in R^{7\times7}$ 및 $C(q, \dot{q}) \in R^{7\times7}$, $\Phi(q) \in R^{7\times1}$ 이다.

2.4 미끄럼관절 공간의 동역학 모델링

본 논문에서 개발한 인체형 10 자유도 이족보행로봇은 토크와 안정성의 한계점을 극복하기 위하여 고 강성의 높은 기어 비를 갖는 볼나사를 사용하였다. 구동형태는 사절 링크구조에서 회전링크의 한 변을 볼나사를 사용하여 직선운동으로 대체한 형태이다. 볼나사의 길이변화는 서로 연결된 다른 링크의 회전각을 변환시키고 궁극적으로 로봇 다리의 회전축을 구동한다. 따라서 운동 방정식은 미끄럼관절 공간에서의 운

동방정식으로 변환되어야 한다. 즉, 회전관절 공간에서의 동역학식을 유도한 후, 4절 링크기구의 운동방정식을 유도하여 궁극적으로 볼나사 좌표계에서의 방정식으로 표현한다. 제어입력의 형태도 관절구동을 위한 토크 입력을 볼나사 구동방향에 대한 힘의 입력으로 변환한다. 앞서 회전관절공간의 운동방정식은 Pitch운동을 하는 관절각 q 와 토크 τ 의 관계를 정립한 식이다. 이를 볼 나사의 직선운동 변위 d 와 직선운동 방향의 구동력 F 의 관계로 정립하고자 한다.

2.4.1 사절링크 기구를 이용한 발목의 운동방정식

발목에서 회전운동을 직선운동으로 변환하는 사절링크 구조를 Fig 2.4 에 나타내었다. 여기서 a_3 는 발목관절과 무릎관절을 연결하는 종아리 링크부분의 길이이다. 운동 형태는 사절기구에서 d_1 부분이 미끄럼 운동을 할 때, α_1 을 제외한 나머지 내부 각들의 회전과 함께 발목관절이 회전하는 구조이다. 평행 사변형의 법칙에서,

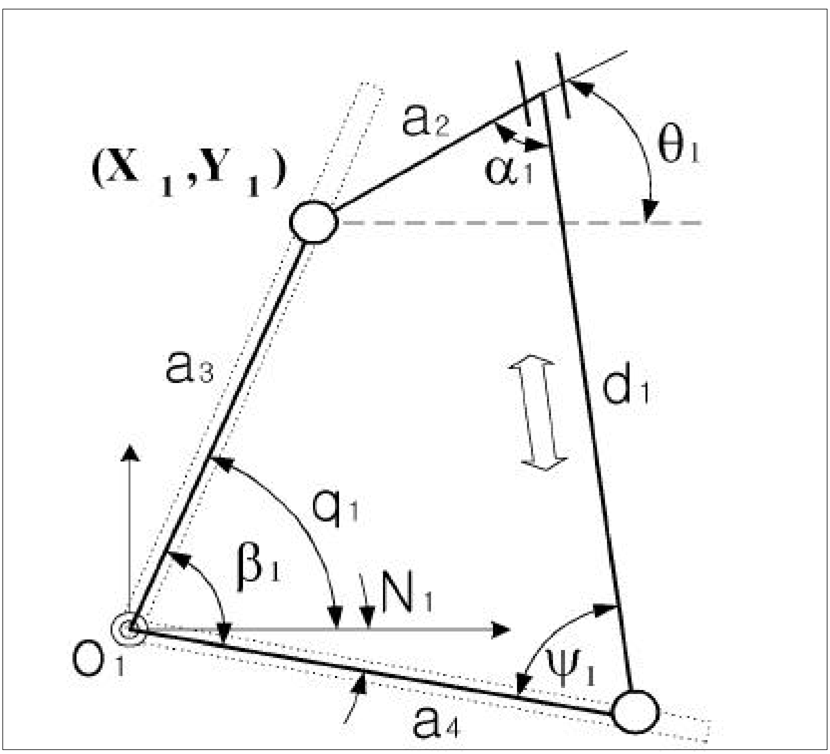


Fig 2.4 Kinematics model of Ankle joint (Support leg)

$$d_1^2 = a_3^2 + a_4^2 - a_2^2 - 2a_3a_4\cos\beta_1 + 2d_1a_2\cos\alpha_1$$
$$= A_1 + B_1\cos\beta_1 + C_1 d_1 \quad (2.\ 53)$$

여기서,

$A_1 = a_3{}^2 + a_4{}^2 - a_2{}^2$, $B_1 = -2a_3a_4$, $C_1 = 2a_2\cos\alpha_1$

즉, 사절 링크 구조에 있어서 변수는 α_1 을 제외한 나머지 내부 각들과 볼나사의 길이 방향의 변위 d_1 이다. 그러나 a_1, a_2 및 a_3 는 고정된 링크길이며, α_1 과 N_1 은 고정된 각이다. 따라서 식 (2. 53)에서와 같이 평행 사변형의 법칙을 사용하여 d_1 과 β_1 의 관계식을 유도할 수 있다. 위의 식을 볼 나사의 미끄럼 변위 d_1 에 관하여 인수분해 법칙을 사용하면 2 개의 근이 얻어지는 데, 볼나사의 길이는 항상 양의 값이므로 정리하면 다음과 같다.

$$d_1 = \frac{C_1 + [C_1^2 + 4(A_1 + B_1\cos\beta_1)]^{0.5}}{2} \quad (2.\ 54)$$

식 (2. 54)을 시간에 대해서 미분하면 미끄럼 변위 d_1 의 속도 및 가속도를 구할 수 있다.

$$\dot{d}_1 = -[C_1^2 + 4(A_1 + B_1\cos\beta_1)]^{0.5} B_1 \sin\beta_1 \dot{\beta}_1 \quad (2.\ 55)$$

$$\ddot{d}_1 = -2[C_1^2 + 4(A_1 + B_1\cos\beta_1)]^{-1.5} B_1^2 \sin^2\beta_1 \dot{\beta}_1^2$$
$$- [C_1^2 + 4(A_1 + B_1\cos\beta_1)]^{-0.5}(B_1\cos\beta_1 \dot{\beta}_1^2 + B_1\sin\beta_1 \ddot{\beta}_1) \quad (2.\ 56)$$

발목의 경우 β_1 과 q_1 의 관계는 양의 관계이므로, 식 (2. 54) ~ (2. 56) 에서 q_1 과 d_1 의 관계를 구하면 다음과 같다.

$$\dot{\beta}_1 = \dot{q}_1 = R_{11}\dot{d}_1, \quad \ddot{\beta}_1 = \ddot{q}_1 = R_{21}\dot{d}_1^2 + R_{31}\ddot{d}_1 \quad (2.\ 57)$$

여기서,

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

$$R_{21} = -2[C_1^2 + 4(A_1 + B_1 \cos\beta_1)]^{-1} B_1 \sin\beta_1 R_{11}^2 + \frac{\cos\beta_1}{\sin\beta_1} R_{11}^2$$

$$R_{31} = -\frac{[C_1^2 + 4(A_1 + B_1 \cos\beta_1)]^{0.5}}{B_1 \sin\beta_1}$$

으로 주어진다. 식(2. 57)에서 유도된 q_1 과 d_1 의 관계식은 앞서 유도되었던 식(2. 52)에 대입한다. 그리하여 발목에 대한 미끄럼 관절의 속도 및 가속도의 함수로 표현되고 결과적으로 발목에 대한 미끄럼 관절의 동역학 방정식으로 변환된다.

2.4.2 사절링크 기구를 이용한 무릎의 운동방정식

무릎관절에 적용된 사절 링크기구는 Fig 2.5 에 나타난 바와 같이 발목관절의 구조와 동일하다. 따라서 운동 형태는 발목에서와 같이 사절기구의 한 변위인 d_2 부분이 미끄럼 운동을 할 때, α_2 를 제외한 나머지 내부 각들의 회전과 함께 무릎관절이 회전하는 구조이다. 평행 사변형의 법칙에서,

$$d_2^{\,2} = A_2 + B_2 \cos\beta_2 + C_2 d_2 \qquad (2.\ 58)$$

여기서,

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

발목 및 힙의 사절링크에서는 볼나사의 길이 변위 d_1, d_3 가 줄어들 때, 동일하게 회전관절의 각 변위 q_1, q_3 역시 줄어드는 양의 관계에 있지만 무릎의 경우에서는 반대의 관계에 있다. 즉, 볼나사의 길이가 감소할 때는 반대로 무릎의 상대 각은 늘어난다. 따라서 회전 관절 각 변위와 볼 나사의 미끄럼 변위의 관계는 다음과 같다.

$$\dot\beta_2 = -\dot q_2 = R_{12} \dot d_2, \quad \ddot\beta_2 = -\ddot q_2 = -R_{22} \dot d_2^2 - R_{32} \ddot d_2 \qquad (2.\ 59)$$

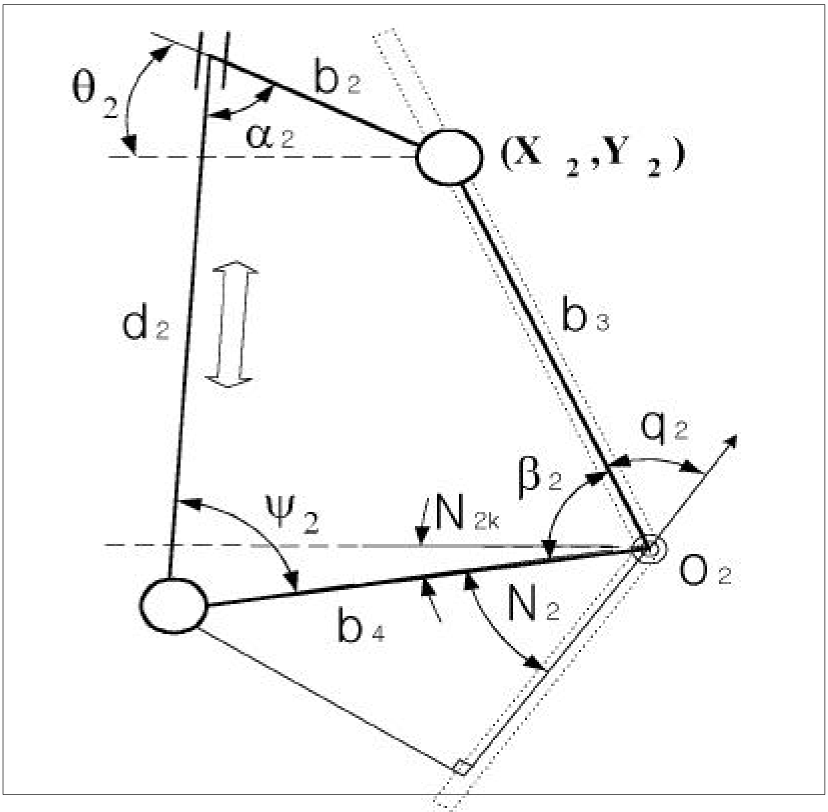


Fig 2.5 Kinematics model of Thigh joint (Support leg)

여기서,

$$R_{12} = \frac{[C_2^2 + 4(A_2 + B_2\cos\beta_2)]^{0.5}}{B_2\sin\beta_2}$$

$$R_{22} = -2[C_2^2 + 4(A_2 + B_2\cos\beta_2)]^{-1}B_2\sin\beta_2 R_{12}^2 + \frac{\cos\beta_2}{\sin\beta_2}R_{12}^2$$

$$R_{32} = -\frac{[C_2^2 + 4(A_2 + B_2\cos\beta_2)]^{0.5}}{B_2\sin\beta_2}$$

식(2. 59)**에서 유도된 관계식을 식**(2. 52)**에 대입하면 결과적으로 무릎에 대한 미끄럼 관절의 동역학 방정식을 유도할 수 있다**.

2.4.3 사절링크 기구를 이용한 힙의 운동방정식

힙 관절에 적용된 사절 링크기구는 Fig 2.6 에 나타난 바와 같이 발목관절의 구조와 동일하다. 발목에서와 같이 사절기구의 한 변위인 d_3 부분이 미끄럼 운동을 할 때, α_3 를 제외한 나머지 내부 각들의 회전과 함께 힙 관절이 회전하는 구조이다.
평행 사변형의 법칙에서,

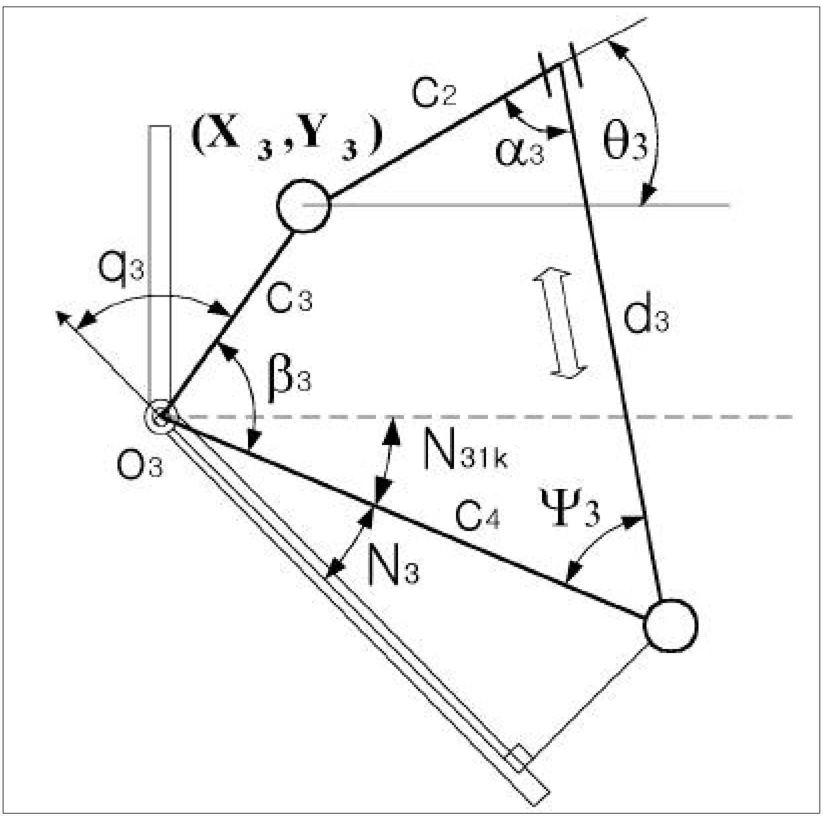


Fig 2.6 Kinematics model of Hip joint (Support Leg)

$$d_3^2 = A_3 + B_3 \cos \beta_3 + C_3 d_3 \qquad (2.60)$$

여기서,

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

힙의 사절링크 구조에서는 볼 나사의 길이 변위 d_3 가 줄어들 때, 동일하게 회전관절의 각 변위 q_3 역시 줄어드는 양의 관계에 있으므로 다음과 같은 관계식을 가진다.

$$\dot{\beta}_3 = \dot{q}_3 = R_{31}\dot{d}_3 , \quad \ddot{\beta}_3 = \ddot{q}_3 = R_{32}\dot{d}_3^2 + R_{33}\ddot{d}_3 \tag{2. 61}$$

여기서,

$$R_{13} = \frac{[C_3^2 + 4(A_3 + B_3\cos\beta_3)]^{0.5}}{B_3\sin\beta_3}$$

$$R_{23} = -2[C_3^2 + 4(A_3 + B_3\cos\beta_3)]^{-1}B_3\sin\beta_3 R_{13}^2 + \frac{\cos\beta_3}{\sin\beta_3}R_{13}^2$$

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

발목 및 무릎과 마찬가지로 식(2. 61)에서 유도된 관계식을 식 (2. 52)에 대입하면 결과적으로 힙에 대한 미끄럼 관절의 동역학 방정식을 유도할 수 있다.
앞서 유도된 발목, 무릎 및 힙에 있어서 회전관절 각의 변위 q_i 와 볼나사 길이 방향의 미끄럼 변위 d_i 의 관계식을 회전관절구조에서의 Euler-Lagrange 방정식에 대입함에 따라서 식 (2. 52)의 좌변에 있는 관성행렬 및 Chrostoffel 항, 위치에너지 항의 변수였던 관절각 변위 $[q_1, \ldots, q_7]^T$ 가 미끄럼 변위 $[d_1, \ldots, d_6, q_7]^T$ 로 대체되고, 제어입력을 제외한 미끄럼 관절 공간에서의 운동방정식으로 변환한다.
단, 여기서 균형관절인 q_7 의 경우 회전관절이므로 회전관절 변위를 그대로 사용한다.

2.4.4 미끄럼 관절공간의 제어입력

제어입력의 형태도 관절구동을 위한 토크 입력을 볼 나사 구동방향에 대한 힘의 입력으로 변환한다. 즉, 앞서 회전관절공간의 운동방정식에서의 회전관절에 발생하는 토크 τ 를 볼 나사의 직선운동에 의한 직선운동 방향의 구동력 F 의 관계로 정립하고자 한다. 회전관절 공간의 제어입력인 토크 τ 는 $i = 1, .., 6$ 일 때, 각 관절공간상의 좌표계 O_i 에서 발생한다. 직선운동 방향의 구동력 F 의 관계식을 유도하기 위

해 각각의 볼 나사의 미끄럼 방향에 수직인 법선을 그렸을 때, 이 법선 길이와 볼 나사에 가해지는 구동력 F 의 곱이 각 관절에서 발생하는 토크 τ 가 된다. 단, O_7 인 상부 균형관절은 직접적으로 토크 입력을 받는다.

우선적으로, 발목관절 (O_1) 에 작용하는 토크 τ_1 와 사절기구의 구동원인 볼 나사의 제어입력 F_1 사이의 관계식을 유도한다. Fig 2.4 에 표시된 바와 같이 4절 링크의 회전부분에 임의의 좌표 (X_1, Y_1) 에 대한 평행사변형의 원리를 이용하여 다음 식을 정리할 수 있다.

$$d_1\cos(\Psi_1 + N_1) + a_2\cos\theta_1 = a_4\cos N_1 - a_3\cos(\beta_1 - N_1) = C_1 \qquad (2.62)$$

$$d_1\sin(\Psi_1 + N_1) - a_2\sin\theta_1 = a_4\sin N_1 + a_3\sin(\beta_1 - N_1) = D_1 \qquad (2.63)$$

여기서, $\theta_1 = \pi - N_1 - (\alpha_1 + \Psi_1)$ 이며, $\beta_1 = q_1 + N_1$ 이다.

식 (2.62)에서 아래의 식을 유도할 수 있다.

$$\begin{aligned} C_1 &= d_1\{\cos\Psi_1\cos N - \sin\Psi_1\sin N_1\} \\ &\quad + l_2\{\cos(\pi - N_1)\cos(\alpha_1 + \Psi_1) + \sin(\pi - N_1)\sin(\alpha_1 + \Psi_1)\} \\ &= d_1\cos\Psi_1\cos N_1 - d_1\sin\Psi_1\sin N_1 + a_2\cos(\pi - N_1)\{\cos\alpha_1\cos\Psi_1 \\ &\quad - \sin\alpha_1\sin\Psi_1\} + a_2\sin(\pi - N_1)\{\sin\alpha_1\cos\Psi_1 + \cos\alpha_1\sin\Psi_1\} \\ &= A_1\cos\Psi_1 - B_1\sin\Psi_1 \end{aligned} \qquad (2.64)$$

여기서,

$$A_1 = S_1 + U_1\cos\phi_1 + V_1\sin\phi_1, \quad B_1 = T_1 + U_1\sin\phi_1 - V_1\cos\phi_1$$

또한, 위의 정의에 사용된 기호는 다음과 같다.

$$S_1 = d_1 \cos N_1 \quad , \quad T_1 = d_1 \sin N_1$$

$$U_1 = a_2 \cos(\pi - N_1) \quad , \quad V_1 = a_2 \sin(\pi - N_1)$$

다음으로 식 (2. 63)**에서 아래의 식을 유도할 수 있다**.

$$\begin{aligned} D_1 = & \ d_1\{\sin\Psi_1 \cos N_1 + \cos\Psi_1 \sin N_1\} \\ & - a_2\{\sin(\pi - N_1)\cos(\alpha_1 + \Psi_1) + \cos(\pi - N_1)\sin(\alpha_1 + \Psi_1)\} \\ = & \ d_1 \sin\Psi_1 \cos N_1 + d_1 \cos\Psi_1 \sin N_1 - a_2 \sin(\pi - N_1)\{\cos\alpha_1 \cos\Psi_1 \\ & - \sin\alpha_1 \sin\Psi_1\} + l_2 \cos(\pi - N_1)\{\sin\alpha_1 \cos\Psi_1 + \cos\alpha_1 \sin\Psi_1\} \\ = & \ B_1 \cos\Psi_1 + A_1 \sin\Psi_1 \end{aligned} \qquad (2.\ 65)$$

식 (2. 65)**에 사용된 기호는 식** (2. 64)**에서 정의된 것과 동일하다**.
앞서 유도된 두 식을 사용하여 발목 좌표계에서 볼 나사 미끄럼 방향에 수직인 법선의 길이는 다음과 같이 유도된다.

$$\Psi_1 = atan\left(\frac{A_1 D_1 - B_1 C_1}{A_1 C_1 + B_1 D_1}\right) \quad , \quad L_1 = a_4 \times \cos\Psi_1 \qquad (2.\ 66)$$

따라서 발목에 있어서 회전 관절공간 운동방정식에서의 회전관절에 발생하는 토크 τ_1 **를 볼 나사의 직선운동에 의한 직선운동 방향의 구동력** F_1 **의 관계로 유도할 수 있다**.

$$\tau_1 = F_1 \times L_1 = F_1 \times a_4 \cos\Psi_1 \qquad (2.\ 67)$$

지지부 무릎의 경우에서는 Fig 2.5 **에 표시된 바와 같이 임의의 좌표** (X_2, Y_2) **에 대한 평행사변형의 원리를 이용하면 다음과 같다**.

$$d_2 \cos(\Psi_2 + N_{2k}) + b_2 \cos\theta_2 = b_4 \cos N_{2k} - b_3 \cos(\beta_2 - N_{2k}) = C_2 \qquad (2.\ 68)$$

$$d_2 \sin(\Psi_2 + N_{2k}) - b_2 \sin\theta_2 = b_4 \sin N_{2k} + b_3 \sin(\beta_2 - N_{2k}) = D_2 \qquad (2.69)$$

여기서,

$\theta_2 = \pi - \alpha_2 - (N_{2k} + \Psi_2)$ 이며,

또한, $N_{2k} = q_1 - N_2$ 및 $\beta_2 = \pi - (q_2 + N_2)$ 이다.

발목에서와 마찬가지로 무릎의 경우도 다음과 같이 표현된다.

$$C_2 = A_2 \cos\Psi_2 - B_2 \sin\Psi_2 , \quad D_2 = B_2 \cos\Psi_2 + A_2 \sin\Psi_2$$

여기서 A_2 및 B_2 에 대한 정의 구조는 발목과 동일하지만, 단지 안의 파라미터가 다음과 같이 변한다.

$$S_2 = d_2 \cos N_{2k} , \quad T_2 = d_2 \sin N_{2k}$$

$$U_2 = b_2 \cos(\pi - N_{2k}) , \quad V_2 = b_2 \sin(\pi - N_{2k})$$

무릎 관절에 대한 볼 나사 미끄럼 방향에 수직인 법선의 길이는 다음과 같이 유도된다.

$$\Psi_2 = atan\left(\frac{A_2 D_2 - B_2 C_2}{A_2 C_2 + B_2 D_2}\right) , \quad L_2 = b_4 \times \cos\Psi_2 \qquad (2.70)$$

따라서 무릎에 있어서 회전관절에 발생하는 토크 τ_2 를 볼 나사의 직선운동에 의한 직선운동 방향의 구동력 F_2 의 관계로 유도할 수 있다.

$$\tau_2 = F_2 \times L_2 = F_2 \times b_4 \cos\Psi_2 \qquad (2.71)$$

힙의 경우에서는 Fig 2.6 에 표시된 바와 같이 임의의 좌표 (X_3, Y_3) 에 대한 평행사변형의 원리를 이용하면 다음과 같다.

$$d_3\cos(\Psi_3 + N_{3k}) + c_2\cos\theta_3 = c_4\cos N_{3k} - c_3\cos(\beta_3 - N_{3k}) = C_3 \quad (2.72)$$

$$d_3\sin(\Psi_3 + N_{3k}) - c_2\sin\theta_3 = c_4\sin N_{3k} + c_3\sin(\beta_3 - N_{3k}) = D_3 \quad (2.73)$$

여기서,

$\theta_3 = \pi - \alpha_3 - (N_{3k} + \Psi_3)$ **이며,**

또한, $N_{3k} = (q_1 + q_2) - N_3$ **및** $\beta_3 = q_3 - (\pi + N_3)$ **이다.**

식 (2. 72) **및** (2. 73) **은 다음과 같이 유도할 수 있다.**

$$C_3 = A_3\cos\Psi_3 - B_3\sin\Psi_3, \quad D_3 = B_3\cos\Psi_3 + A_3\sin\Psi_3$$

발목 및 무릎의 경우와 같이 힙 관절에 대한 볼 나사 미끄럼 방향에 수직인 법선의 길이는 아래와 같다.

$$\Psi_2 = atan\left(\frac{A_2D_2 - B_2C_2}{A_2C_2 + B_2D_2}\right), \quad L_3 = c_4 \times \cos\Psi_3 \quad (2.74)$$

따라서 힙 관절에 발생하는 토크 τ_3 **를 볼 나사 직선방향의 구동력** F_3 **의 관계는 다음과 같다.**

$$\tau_3 = F_3 \times L_3 = F_3 \times c_4\cos\Psi_3 \quad (2.75)$$

2.4.5 미끄럼 관절 공간의 동역학 방정식

본 논문에서 제작한 이족보행로봇에 있어서 각 관절의 구동 형태는 감속기를 부착한 모터를 직접적으로 관절에 연결한 형태가 아니다. 사절 링크구조에서 회전링크의 한 변을 볼 나사를 사용하여 직선운동으로 대체함으로서 볼 나사의 길이변화에 의한 서로 연결된 다른 링크의 회전각을 변환시키고 궁극적으로 로봇 다리의 회전축을 구동한다. 따라서 운동 방정식은 미끄럼관절 공간에서의 운동방정식으로 변환되어야 한

다. 앞서 유도된 발목, 무릎 및 힙에 있어서 회전관절 각의 변위 q_i 와 볼나사 길이 방향의 미끄럼 변위 d_i 의 관계식을 회전관절구조에서의 Euler-Lagrange 방정식의 좌변에 대입함에 따라서 식 (2. 52)의 좌변에 있는 관성행렬 및 Chrostoffel 항, 위치에너지 항의 변수였던 관절각 변위 $[q_1, .., q_7]^T$ 가 $[d_1, .., d_6, q_7]^T$ 인 미끄럼 변위로 대체되었다. 또한 우변의 제어입력에 대하여 식 (2. 67) 및 (2. 71), (2. 75)처럼 관절구동을 위한 토크 입력을 볼 나사 구동방향에 대한 힘의 입력으로 변환하였다. 즉, 회전관절 공간과 미끄럼 관절공간의 관계식과 토크 τ_i 와 구동력 F_i 관계를 이용하여 7 자유도에 관한 회전 관절공간의 Euler-Lagrange 방정식인 식(2. 52)을 다음의 미끄럼 관절공간의 식으로 표현하였다.
단, 여기서 균형관절인 q_7 의 경우 회전관절이므로 회전관절 변위 및 토크 제어입력을 그대로 사용한다.

$$D(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + \Phi(q) = \tau$$

위의 식은 다음과 같이 변환된다.

$$H(d)\ddot{d} + Q(d, \dot{d})\dot{d} + \Phi(d) = LF \tag{2. 76}$$

여기서, $i, j = 1, ..., 6$ 일 때

$$H(d)_{ij} = D(d)_{ij} R_{3i}(d) \ , \ Q(d, \dot{d})_{ij} = C(d, \dot{d})_{ij}\dot{d} + R_{1j}(d)\dot{d}_j^2$$

$$L_i = l_4 \cos \Psi_i$$

단, l_4 는 지지부 다리의 발목, 무릎 및 힙 등의 관절 좌표계 순서 ($O_1 \sim O_6$) 에서 a_4, b_4, c_4 ... 임을 말한다.

Ⅲ. 동역학 모델링에 대한 시뮬레이션

이족보행로봇의 보행을 구현하기 위해서, 본 논문에서는 보행 동작 중 한쪽지지 상태의 동역학 해석을 수행하였다. 이를 통해 앞서 유도되었던 Pitch운동을 하는 7 자유도의 운동방정식의 특성을 살펴보기 위해 컴퓨터 시뮬레이션을 행하였다.
본 시뮬레이션의 목적은 제어기의 부착 및 지면의 반발력에 대한 Z.MP (Zero moment point)등을 부착한 완성된 보행알고리즘을 구현하기에 앞서 기본이 되는 각 회전관절 공간의 운동과 볼 나사의 미끄럼 관절공간 운동 사이의 관계에 대한 검증을 하기 위함이다. 운동 방정식의 모델링에 대한 검증을 위하여 로봇 관절의 운동범위에 다음의 한계조건을 주었다. 외력 F_i 는 가하지 않고 중력항만을 고려했으며 지면에 대한 반발력은 고려하지 않았다. 지지부 다리의 발목에 기저 좌표계가 설치된 전방보행에 있어, 각 관절의 움직임이 한계조건을 넘어서면 멈추도록 설정하였다. 각 관절의 회전범위의 한계는 다음과 같다.

$45^\circ < q_1 < 90^\circ$, $45^\circ < q_6 < 90^\circ$ (발목)

$0^\circ < q_2 < 90^\circ$, $-90^\circ < q_5 < 0^\circ$ (무릎)

$-45^\circ < q_3 < 25^\circ$, $155^\circ < q_4 < 225^\circ$ (힙)

$-150^\circ < q_7 < 150^\circ$ (균형관절)

실제적으로 이족보행로봇의 보행 시 지지부 다리 및 운동부 다리에 대한 허벅지 사이의 상대 각은 지지부 다리를 세웠을 때, 전방에 있어서 45° 이상을 넘지 않으며 후방에 있어서는 -25° 를 넘지 않는다. 또한 발목에 대한 구부러지는 각도는 45° 이상으로 하였다. 이러한 보행의 움직임 형태는 사람의 전방보행에 있어서 몸의 자중을 전방으로 향하고 자신의 보폭을 자신의 발바닥의 크기 정도로 하고 걸을 때의 형상과 흡사한 형태이다.
시뮬레이션에는 C 언어를 이용한 4차 Runge-Kutta 법이 사용되었다. 이족 로봇의 모델링에 사용된 물성치는 아래의 Table 3.1 과 같다.

Table 3.1 Material properties of the biped walking robot

Index	Length (㎜)	Mass (㎏)	Mass of Inertia (Kg.㎟)
Shank (l_1 , l_5)	350	1.3718	15130
Shank C.O.M (l_{c1} , l_{c5})	176.72	''	''
Thigh (l_2 , l_4)	350	1.2433	13120
Thigh C.O.M (l_{c2} , l_{c4})	161.22	''	''
Hip (l_3)	250	1.7118	14658
Hip C.O.M(l_{c3})	127.23	''	''
Pendulum (l_{c7})	107.24	1.5118	16800
Swing Foot(l_{c6})	30.23	0.7118	4658
TOTAL		10.8774	107274

여기서 C.O.M(Center of mass)은 질량중심까지의 길이다.
다음으로 각 회전관절의 초기 회전각을 다음과 같이 두었을 때, 자중에 의한 볼 나사 길이 및 관절 각의 운동변화를 나타내었다.

$q_1 = 60^\circ$, $q_6 = 50^\circ$ (발목)

$q_2 = 60^\circ$, $q_5 = -60^\circ$ (무릎)

$q_3 = -30^\circ$, $q_4 = 210^\circ$ (힙)

$q_7 = 0^\circ$ (균형관절)

위의 다리 형상은 상체를 조금 숙인 기마 자세의 형상이다. 실제적으로 사람이 전방보행을 할 때 사람의 직립 보행 형태는 발목 및 무릎을 조금씩 구부린 형태로 보행한다. 그것은 두발 지지단계에서 한발 지지단계를 거치면서 반복되는 걸음 형상에 있어 순간적으로 지지하는 다리의 발바닥이 그리는 폐곡선 안에 몸 전체의 움직임에 대한 모멘트 평형 점을 두기 위함이다. 따라서 사람은 넘어지지 않고 보행할 수 있다. 위와 같은 초기형태를 정하고 전방보행에 관한 시뮬레이션을 실행하였다. 단, 각 관

절부위에 외력 F_i 는 가하지 않고 중력항만을 고려했을 때의 시뮬레이션이므로 결과적으로 이족 로봇의 움직임은 서있는 자세에서 주저앉는 자세로 변화하게 될 것이다. 또한 지면에 대한 반발력은 고려하지 않았기 때문에 지지부 다리의 발바닥이 지면에 고정되고 운동부의 발목은 단순히 매니퓰레이터의 말단장치와 같이 구속조건이 없고 다만 관절 각의 한계범위 내에서 움직이게 될 것이다.

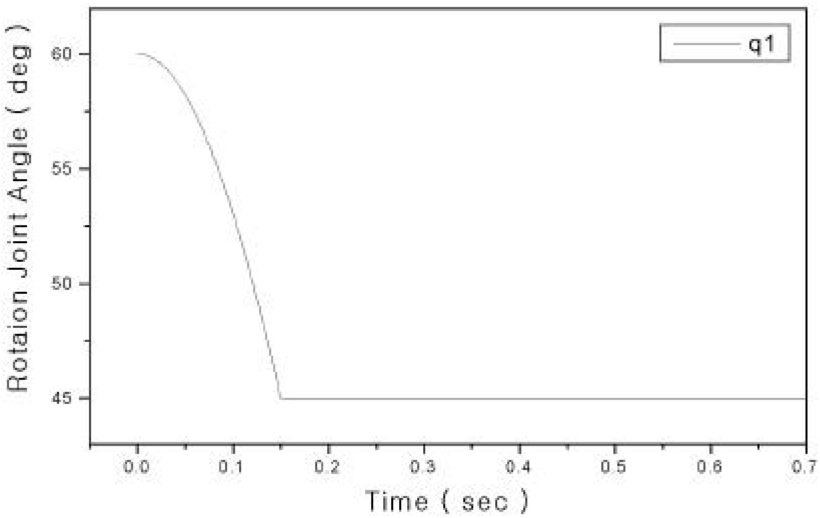


Fig 3.1 Rotation joint angle trajectory of q_1

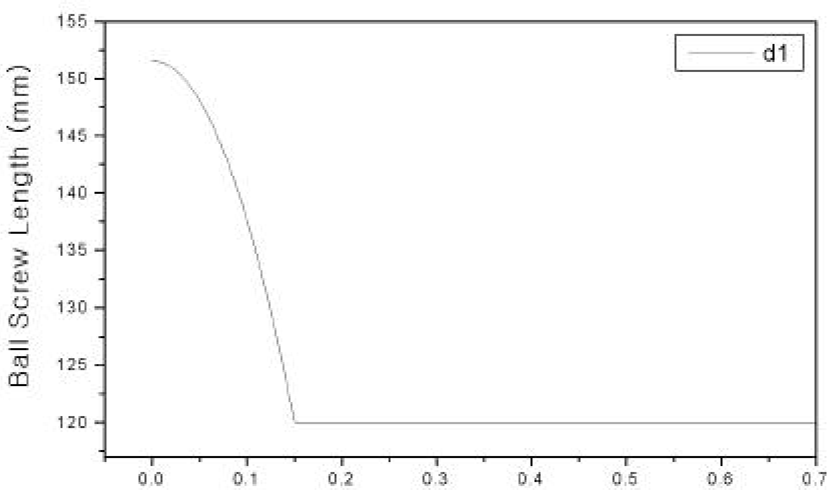


Fig 3.2 Ball screw length trajectory of d_1

Fig 3.1 ~3.2 는 이족보행로봇의 지지부 발목에 대한 관절각과 볼 나사의 길이 변화이다. 초기위치에서 중력방향으로 움직일 때 발목의 기저 좌표계에 대한 발목의 회전각은 줄어들고 식 (2. 54) ~ (2. 56)과 같이 발목에 부착된 볼 나사의 길이도 줄어든다. 한계지점에 도달할 때까지 걸린 시간은 약 0.15 sec 이다. 움직임에 있어 중력방향으로 가속되기 때문에 그래프의 기울기는 처음에 비해서 급격하게 기울어진다.

Fig 3.3 ~ 3.4는 지지부 무릎에서의 관절 각 및 볼 나사의 길이 변화이다. q_2 와 d_2 의 움직임은 반대형상을 가진다. 즉, 식 (2. 59)에서 보는 바와 같이 발목에 대한 무릎의 상대 각이 증가할수록 무릎에 부착된 사절링크의 한 변인 볼 나사의 길이는 감소한다. 또한 한계 각까지 도달하는 시간은 약 0.13 sec 이다. 발목의 움직임과 비교할 때 적은 시간이 소요되었다. 즉, 발목의 경우는 무릎 및 상부 균형관절, 운동부 다리를 포함한 전체 무게중심까지의 거리가 길고 또한, 발목의 움직임에 대한 무릎 및 골반의 상대적 움직임에 따른 Coriolis 힘인 간섭력이 작용함을 알 수 있다.

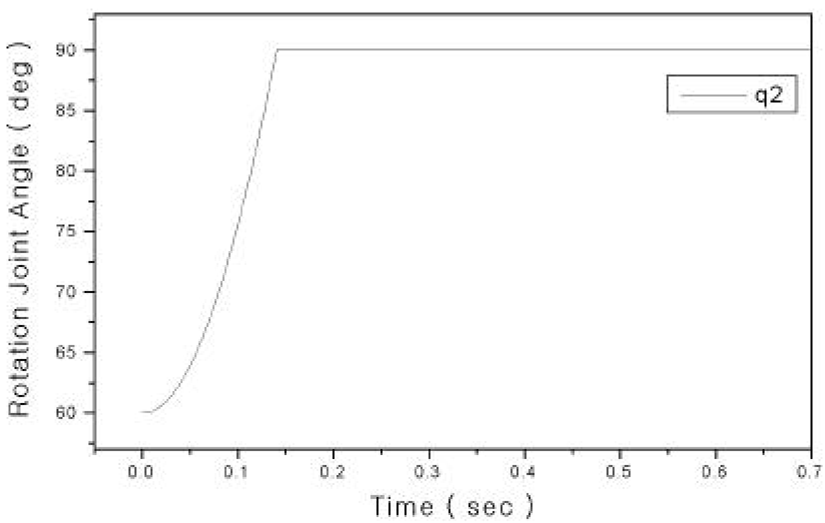


Fig 3.3 Rotation joint angle trajectory of q_2

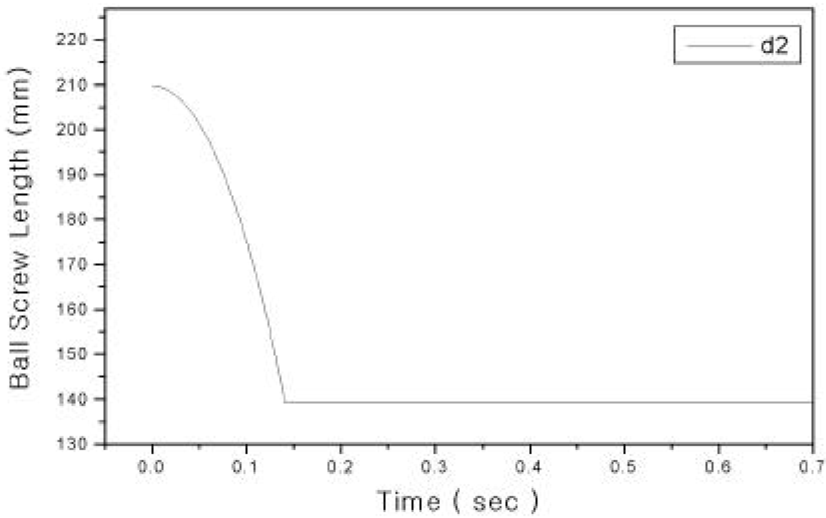


Fig 3.4 Ball screw length trajectory of d_2

Fig 3.5 ~3.6은 지지부 골반에서의 관절 각 및 볼 나사의 길이 변화이다. 관절 각 및 볼 나사의 길이변화에 대한 관계는 식 (2. 61)에서 보이는 바와 같이 발목과 동일한 양의 관계를 가진다. 한계 지점까지 걸린 시간은 약 0.11 sec 정도이다. 무릎과 비교한다면, 무릎에 작용하는 힘 및 상부 균형관절 등에 대한 여러 가지의 간섭작용에 비하여 힙에서는 상부 균형관절의 운동만이 간섭력으로 작용한다.

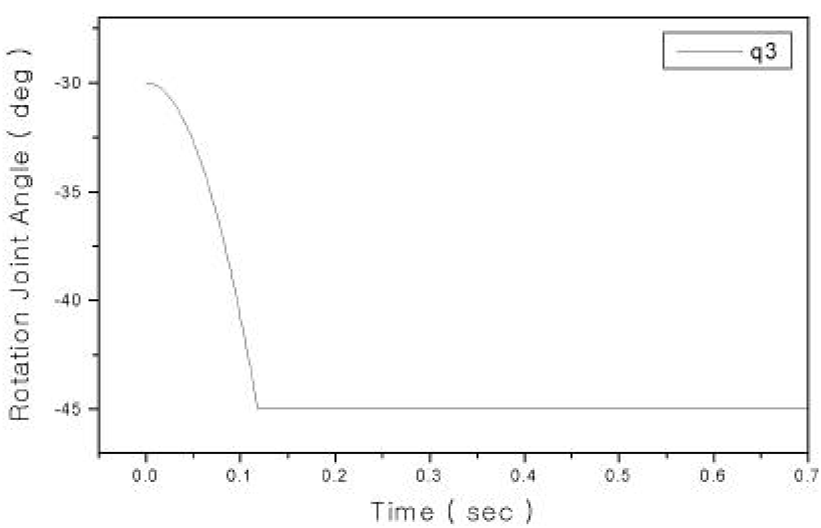


Fig 3.5 Rotation joint angle trajectory of q_3

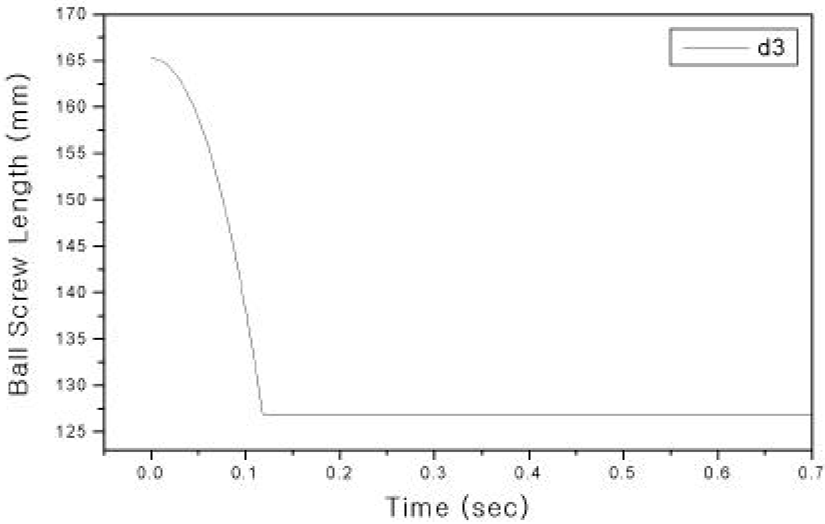


Fig 3.6 Ball screw length trajectory of d_3

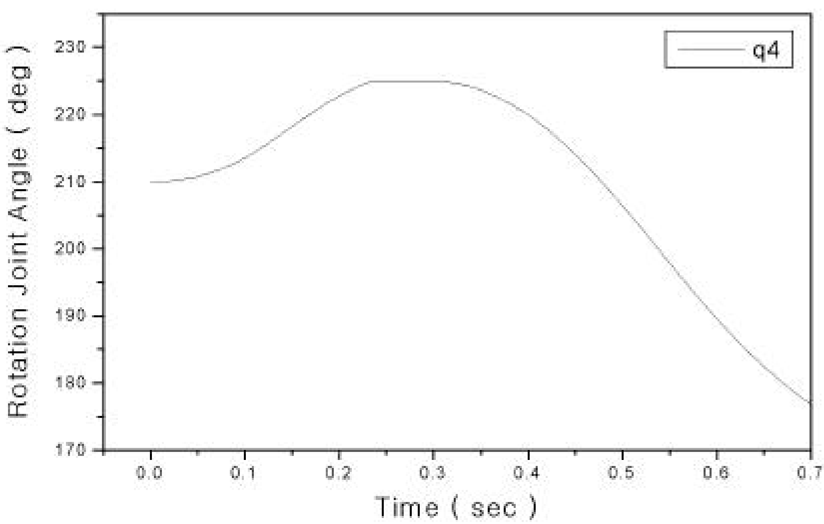


Fig 3.7 Rotation joint angle trajectory of q_4

Fig 3.7 ~3.8 은 운동부 골반에서의 관절 각 및 볼 나사의 길이 변화이다. 앞서 지지부의 발목, 무릎 및 골반의 경우는 한계 지점까지 움직였을 때 더 이상 움직이지 않고 정지되어 있다. 즉, 중력방향에 대한 전체의 움직임에서 지지부의 움직임이 우선적으로 발생한다. 결과적으로 운동부 다리 각 링크들의 움직임은 고정된 지지부 골반에 연결되어서 움직이는 펜듀럼(Pendulum)형태를 가지게 된다. 지지부 골반과 운

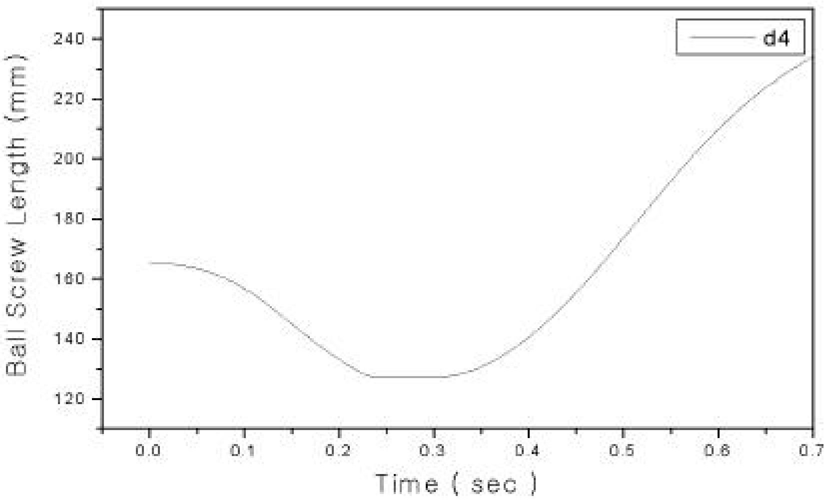


Fig 3.8 Ball screw length trajectory of d_4

동부의 골반의 운동범위는 90° 이상 차이가 남에 따라 관절 각 및 볼 나사의 길이변화에 대한 관계는 지지부 무릎의 경우처럼 음의 관계를 가진다. 처음 약 0.2 sec 까지는 지지부 골반의 회전각이 상대적으로 줄어듦에 따라 운동부의 골반각은 증가한다. 그 이후 지지부 다리가 고정되고 운동부의 무릎 및 발목 링크들의 중력방향의 작용력 및 원심력으로 인하여 골반의 회전각은 결과적으로 줄어드는 형상을 가지게 된다.

Fig 3.9～3.10 은 운동부 무릎에서의 관절 각 및 볼 나사의 길이 변화이다. 처음 초기위치는 무릎을 약간 구부린 형상을 하고 있다. Fig 3.5～ 3.6 에서 보는바와 같이 운동부 골반의 움직임은 시간이 지나감에 따라서 골반의 회전각은 줄어들고 그에 따른 원심력으로 인해서 무릎은 구부러지는 운동형태를 가진다.

지지부의 무릎과 비교한다면, 지지부의 경우는 비록 상부의 균형관절 및 운동부의 동작으로 인한 간섭력이 운동부에 비해서 크게 작용하지만 중력방향의 운동에너지가 운동부의 무릎보다 크기 때문에 한계 지점에 도달하는 시간이 짧아진다. 처음 약 0.15 sec 까지의 기울기는 아주 완만하다. 즉, 지지부 다리 링크들에 작용하는 중력방향의 운동에너지가 운동부 무릎의 운동에너지보다 상대적으로 크다. 또한 한계지점에 도달하는 시간이 적음에 따라 자체적인 운동에너지의 증가보다는 지지부에 대한 중력방향의 구동부하로 작용하는 요소가 크다. 지지부의 동작이 완료된 이후부터 자

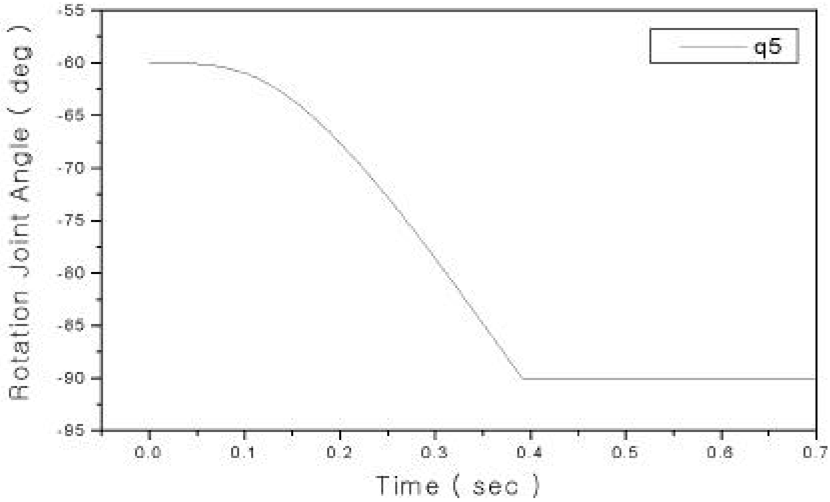


Fig 3.9 Rotation joint angle trajectory of q_5

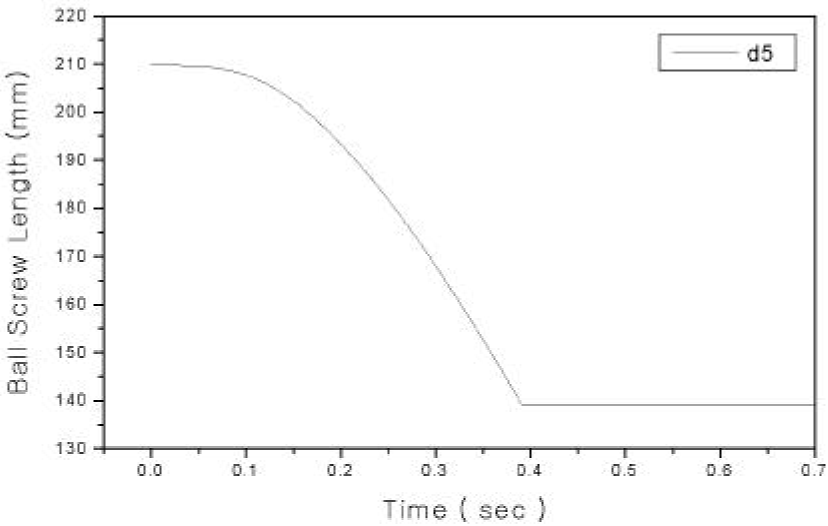


Fig 3.10 Ball screw length trajectory of d_5

체의 하중과 아울러 운동부 발목하중으로 인해서 점차적으로 속도가 증가하게 된다. 이때, 관절 각 및 볼나사의 길이변화에 대한 관계는 양의 관계를 가진다.

Fig 3.11～3.12 는 운동부 발목에서의 관절 각 및 볼나사의 길이 변화이다. 운동부 무릎과 마찬가지로 처음 초기위치는 발목을 약간 구부린 형상을 하고 있다. 시간이 지나감에 따라서 중력 및 원심력의 작용으로 인해 발목이 한계지점까지 구부러지

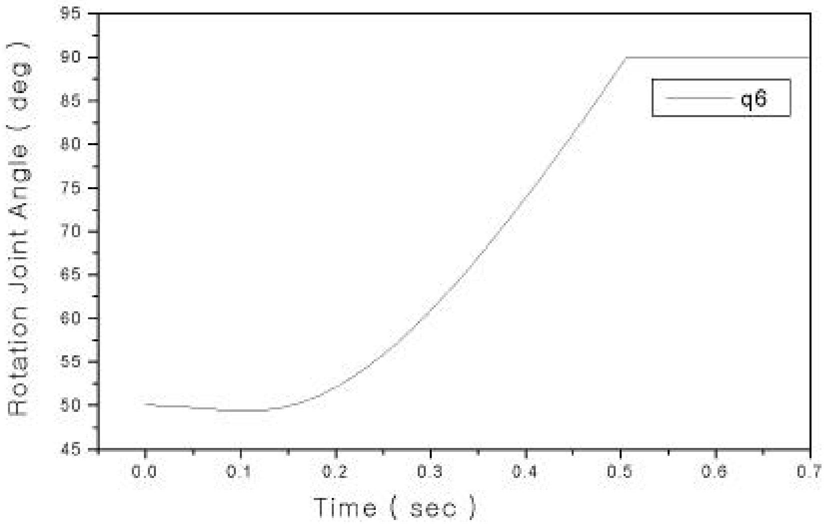


Fig 3.11 Rotation joint angle trajectory of q_6

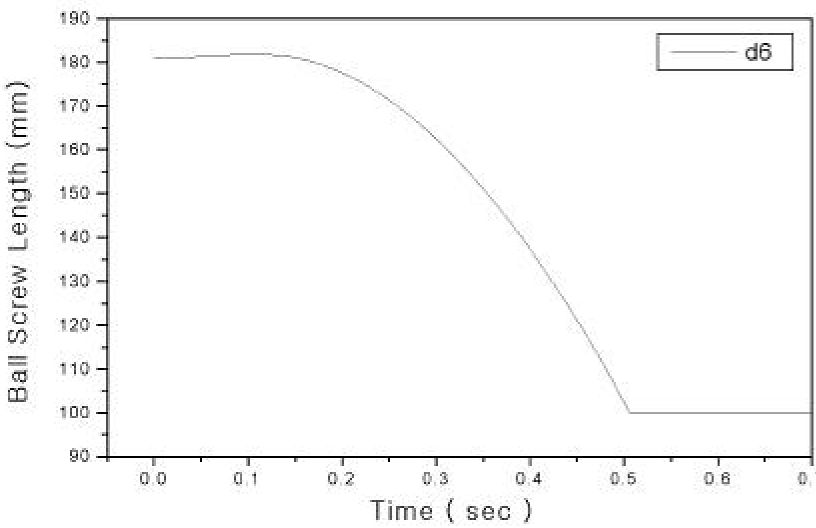


Fig 3.12 Ball screw length trajectory of d_6

는 형태를 이룬다. 운동부 발목의 경우 다른 링크들과 비교해서 무게 및 관성에너지가 적다. 또한 다른 링크의 움직임에 있어 작용하는 간섭력 및 중력항도 작게 작용한다. 따라서 한계지점에 도달하는 시간이 다른 링크들과 가장 늦게 도달하게된다. 처음 약 0.15 sec 까지는 운동부의 무릎과 마찬가지로 자체적인 운동에너지의 증가보다는 지지부에 대한 중력방향의 구동부하로 작용하는 요소가 크다. 지지부의 동작이 완

료된 이후부터 자체의 중력방향의 하중 관성력으로 인하여 점차적으로 그래프의 기울기가 증가하게 된다. 이때, 관절 각 및 볼 나사의 길이변화에 대한 관계는 음의 관계를 가진다.

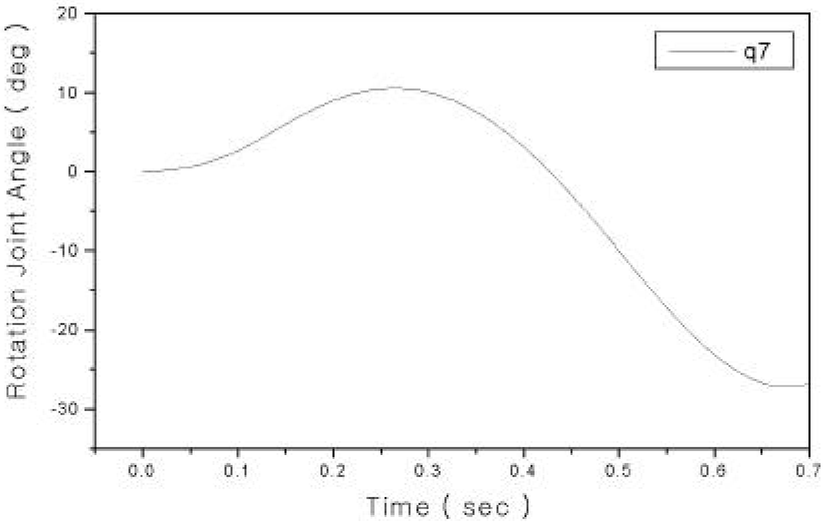


Fig 3.13 Rotation joint angle trajectory of q_7

Fig 3.13 은 상부 균형관절의 Pitch 운동에 대한 관절 각의 변화이다. 상부 균형관절의 형태는 지지부 및 운동부의 다리의 구동형태와는 달리 회전관절의 형태이다.
균형관절의 초기형태는 지면과 수직인 방향으로 서있는 형태이다. 처음 0.2 sec 까지는 지지부 골반 회전각이 줄어듦에 따라서 균형관절의 회전각은 상대적으로 늘어난다. 하지만 아래에 연결되어있는 골반 및 양 다리 링크들의 중력방향에 대한 움직임 및 전진방향에 대한 관성력의 작용으로 인하여 결과적으로 전진방향으로 굽어지는 형상을 가진다.

앞서 나타내었던 전방 보행에 대한 각 관절의 시뮬레이션 내용을 보면 기구의 연쇄적 반응에서 나타난 각 관절링크의 동작형태는 폐쇄형 기구연쇄에서 서로 다른 축을 중심으로 종속적으로 회전하는 물체에 존재하는 코리올리스 힘과 같은 간섭 항 및 관성력 등에 대한 정보를 담고 있다. 또한 움직임의 형태도 중력방향으로 자유 운동하는 매니퓰레이터의 움직임과 유사함을 알 수 있다. 따라서 만족할 만한 결과를 얻었으며 향후 제어기의 부착 및 지면의 반발력에 대한 Z.MP (zero moment point) 등을 부착하여 완성된 보행알고리즘을 구현할 수 있는 기본적인 요소를 획득하였다.

Ⅳ. 10 자유도 이족보행로봇 시스템의 구성

4.1 동력전달 체계

이족보행로봇을 구현하기 위한 핵심요소 중 하나인 동력전달장치는 기존의 동력전달장치에서 구현하기 힘든 특성들을 요구한다. 특히 전달 가능한 토크에 대한 동력전달장치의 자체 중량은 보행구현을 위해서는 반드시 고려되어야 한다. 그리고 동력 전달장치에 사용되는 감속기의 경우 많은 비선형성을 가지고 있다. 이러한 비선형성을 대표하는 것이 백래쉬와 비틀림 강성(Torsional stiffness)이다. 동력전달 장치로 로봇에 많이 사용되는 감속기구 중에서 특히 백래쉬의 양을 극히 줄인 하모닉 드라이버 등의 감속기가 있다. 그러나 하모닉 드라이버의 경우 백래쉬는 극히 작은 대신에 비틀림 강성에 취약한 면이 있어서 히스테리시스 곡선과 같은 또 다른 비선형성을 내포한다. 그 이외의 이족 로봇의 관절 구동기로 사이크로 감속기, RV 감속기, 유성치차 감속기 등이 있으며 비교적 높은 비틀림 강성과 작은 백래쉬 크기를 갖고 있어서 제어기의 부담을 줄일 수 있다. 그러나 이런 제품들의 경우에는 강구(Steel ball) 나 열처리 핀을 기어의 치형 대신에 사용하고 있어서 경량의 소재를 사용하기 어렵다. 따라서 그 특성상 고 감속 비에서 중량이나 크기가 커지는 단점이 있다. 특히 이족보행로봇의 경우와 같이 보행에 있어서 운동부와 지지부 다리가 번갈아 바뀌어 부하조건의 변화가 극심하고, 또한 보행의 안정성을 위한 큰 토크의 변화율이 필요하며 구조상의 좌우대칭 및 부피에 있어서도 소형화가 필요한 감속기의 경우는 구동부 감속기의 경량화 소형화 및 모듈화가 필수적이다. 이러한 단점을 보완하기 위해서 본 논문에서 개발한 인체형 10 자유도 이족보행로봇에서는 백래쉬가 극히 적고 고 토크 및 큰 토크의 변화율을 낼 수 있는 정밀 볼 나사를 사용하였다. 또한 모듈 화된 사절링크 형태의 관절구조를 채택함에 따라서 로봇의 외관도 이전의 모터를 직접 관절에 부착한 형태보다 일보 진전하여 인간의 관절 구조와 흡사하게 설계되었다.

4.2 볼나사 구동기의 특징 및 구조

볼나사의 구조는 다음의 Fig 4.1 과 같다.

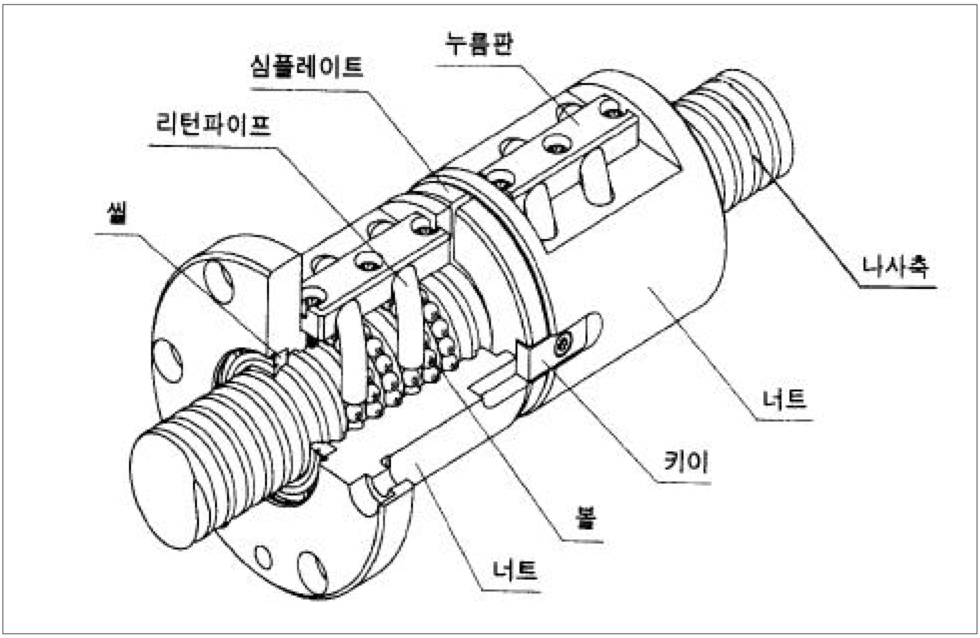


Fig 4.1 Construction of ball screw

볼나사는 나사 축의 홈과 너트의 홈 사이에 조그만 강구(Steel Ball)를 넣어 미끄럼 마찰을 구름마찰로 변환시켜 이송마찰을 줄이고, 마모량을 줄여서 정밀도와 수명을 향상시킨 동력 전달용 나사이다. 또한 볼 나사는 Ball의 강성을 이용하여 백래쉬를 없앨 수 있어 정밀 기계에 널리 사용되고 있다. 또한 볼나사의 정밀도는 나사축의 연삭 정밀도, 너트의 내경연삭 정밀도와 Ball의 정밀도에 의해서 충분한 정밀도를 획득할 수 있다. 이러한 볼나사의 특징을 요약하면 다음과 같다.

1) 90 % 이상의 전달효율

볼나사는 일반적인 감속기와는 달리 기어 치형의 마찰과 같은 형태가 아니라 구름운동을 통하여 동력을 전달한다. 따라서 다른 감속기의 형태에 비해서 마찰 저항이 적음에 따라서 소요되는 토크의 양도 현저히 감속한다.

2) Backlash Zero

위의 그림과 같이 Double nut를 사용하게 되면 축 방향의 Backlash는 Zero가 된다. nut 2개를 사용하여 예압(pre-load)을 걸게 되므로 축 방향의 Backlash 가 Zero 가

되면서 강성 또한 높아지게 된다. 1개의 nut를 사용하여 아주 적은 Backlash로 사용해도 움직임은 아주 부드럽다.

3) 미동(limit motion)이송이 가능

Ball에 의한 구름운동을 하기 때문에 기동마찰이 극히 적다. 따라서 일반적인 감속기 등에서 발생하는 Backlash 및 Stick slip등이 일어나지 않고 정교한 미동이송이나 미세 조정이 가능하다. 따라서 감속기로 사용할 경우 정밀한 모션 제어(μm)를 할 수 있다.

4) 긴 수명

단열 경화된 나사 홈을 Ball이 구름 운동을 하기 때문에 장시간의 운동에도 마모는 극히 적다.

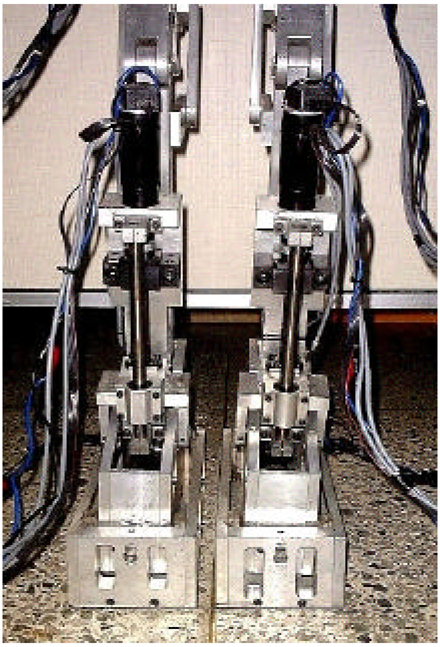
4.3 이족보행로봇의 기구구조

사절링크의 한 변에 볼나사를 이용한 미끄럼 관절구조를 발목과 무릎 및 힙 관절에 부착하였다. 이러한 볼나사를 이용한 관절 구동구조는 볼나사 구동기의 고 강성, 고 토크 및 큰 토크의 변화율을 적용할 수 있다. 이러한 장점은 보행에 있어서 지지각과 유각의 상태가 번갈아 작용하고, 또한 이는 다리의 상태에 따라 구동기에 작용하는 부하로서 이족보행로봇 전체의 자중과 한 다리의 자중으로 변화됨에 따른 이러한 극심한 부하조건의 변동을 보상 할 수 있다. 부하조건을 감소시키기 위해서 상부 균형 관절을 제외한 본체 및 동력전달 체계 모두를 듀랄루민(Aluminum Alloy)으로 제작하였다.

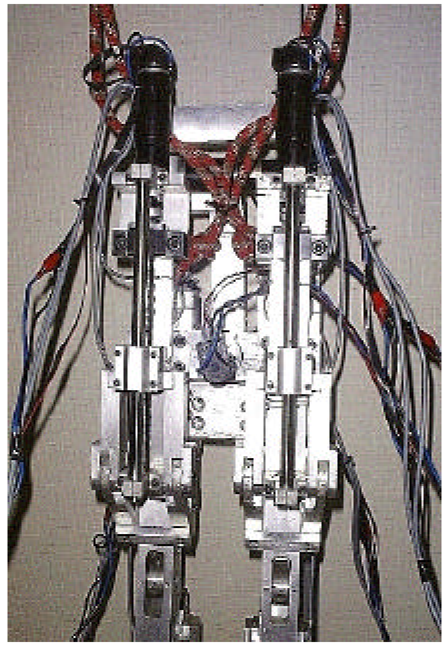
발목관절의 경우, 타 관절에 비하여 구동속도는 늦으나 다양한 걸음새 구현을 위하여 필수적인 균형점 제어의 영역을 발바닥 전체의 영역을 사용할 수 있도록 하기 위하여 타 관절에 비해서 많은 양의 토크를 필요하게 된다.

힙 관절의 경우는, 보행동작에 있어 한발 지지단계인 Swing 동작에서 한 다리의 전체하중을 지지해야하므로 역시 많은 양의 토크를 필요로 한다.

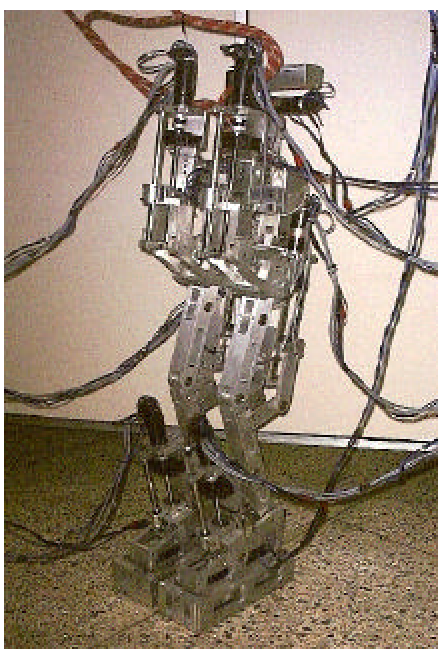
무릎관절의 경우, 상대적으로 큰 보폭의 경우를 위하여 보행 시 발목과 힙 관절에 비해서 상대적으로 빠른 속도의 움직임이 필요하다. 따라서 발목과 힙에 비해서 상대



Pic 4.1 View of Ankle joint



Pic 4.2 View of Thigh & Hip joint



Pic 4.3 View of The 10 D.O.F
biped walking robot

적으로 리드가 큰 볼 나사를 사용함으로서 토크의 크기는 적어지지만 동작 속도를 증대시켰다.

Pic 4.1～4.3 은 볼나사 구동기를 이용한 인체형 10 자유도 이족보행로봇의 실제 사진이다. 2장에서 나타내었던 Fig 2.4 ～ 2.6 에서 보이는 바와 같이 사절링크 구조에 볼나사를 이용한 각 관절의 실제 형태 및 이족보행로봇의 전체 모습이다. 볼 나사 구동기의 장착 방향은 보행시의 간섭들을 제거하기 위하여 모두 외향으로 장착하였으며, 이족 로봇의 중심에 있어서 발목과 무릎의 볼나사 구동기는 중심에서 앞쪽으로 무릎의 볼나사 구동기 및 상부 균형관절은 뒤쪽으로 부착하여 전체적인 균형점이나 무게중심이 이족 로봇의 전체 중심에 근접하게 설계하였다.

이족보행로봇의 경우는 Pic 4.1 에서와 같이 발바닥의 형상은 보행동작에 있어 중요한 부분이다. 이전에 개발된 보행로봇의 경우, 발바닥의 형상이 원형이 경우가 많았다. 이는 보행 시 원하는 균형점을 보행 한 주기에 대하여 지지평면 상의 임의의 한 점으로 고정하면 실제 균형점의 궤적은 대체로 원하는 균형점을 중심으로 타원형상을 이룬다는 점에 근거한 것이다. 그러나 보행속도가 상승하거나 원하는 균형점이 고정되지 않고 시간에 대한 특정한 궤적을 가질 경우에 있어 이러한 형상은 적합하지 않다. 이족 로봇의 보행 시 로봇의 균형점은 오른 다리에서 왼 다리로, 혹은 그 반대로 이전하게 된다. 이러한 경우 두 발바닥 사이의 거리가 되도록 짧고 발바닥의 형상도 진행방향으로 확장되는 것이 보행속도의 상승이나 안정도의 관점에서 바람직하다. 그러나 이족 로봇의 크기가 실제 인체형에 버금 갈 정도로 커지게 되면 로봇의 조립 공차 및 보행 시 외부 하중 등에 의해서 한 다리로 지지하는 보행 동작에 있어 운동부의 다리는 외팔 보와 같이 지지부 다리 쪽으로 처짐을 발생시킬 수 있다. 이러한 처짐이 발생하여 지지부 다리와 운동부 다리의 발바닥 부분이 닿게 되면 지지부의 다른 관절에 비해서 힙 관절은 뒤틀림 현상으로 인하여 큰 손상을 입을 수 있다. 따라서 어느 정도의 간격은 필수적인 요건이 될 수 있다. 이러한 관점에서 인체형 10 자유도 이족보행로봇의 발바닥과 다리가 설계되었다.

균형 관절의 기구구조도 매우 중요한 부분이다. 이에 대한 그림은 Fig 4.2 에서 보는 바와 같다. 이족보행로봇의 보행시 안정화에 직접적으로 연관되는 균형 관절의 기구 구조는 다리부의 운동이나 외부의 충격에 대한 외란 입력에 대해서 보상할 수 있

도록 운동을 하게된다. 또한 균형운동에 따른 충격량도 최소화되어야 한다. 이러한 관점에서 균형 관절의 구조는 좌우대칭의 형태를 가지는 것이 필요하며 이족보행로봇의 보행 시 안정화에 필수적인 무게 이외에 부가적인 장치물이 없는 간소화된 형태의 설계제약 조건이 있다.

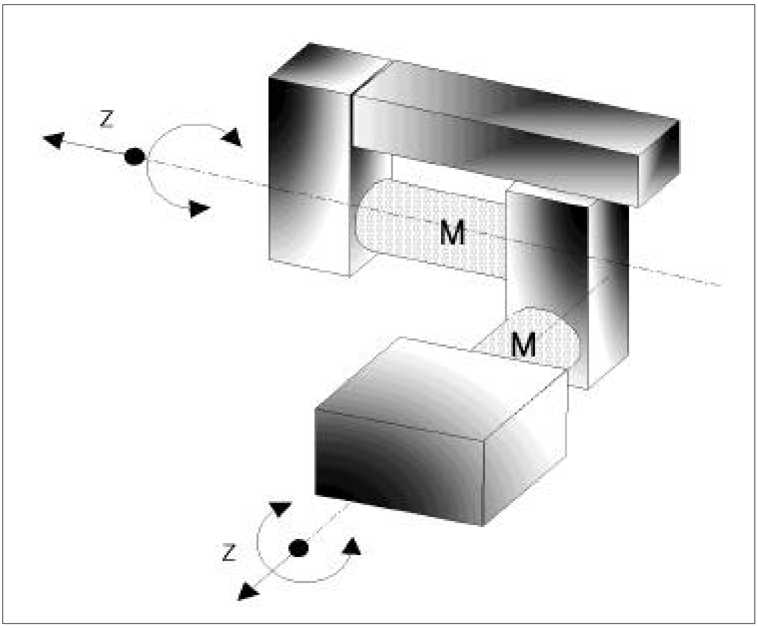


Fig 4.2 Kinematics model of balance joint
(Pitch , Roll)

본 논문에서 실제 제작한 이족보행로봇의 경우, 균형관절은 관절형태의 간소화를 위해서 직접적으로 감속기를 부착한 모터를 Pitch 및 Roll 운동관절에 부착하였다. 또한 위의 제약조건을 충족시키기 위하여 균형관절의 구동 모터가 균형관절의 균형하중에 포함되도록 설계하였다. 이러한 설계조건을 고려하여 제작된 10 자유도 인체형 이족보행로봇의 외형치수는 다음과 같다.

우선 균형관절을 제외한 높이는 $1023mm$ 이고, 고려한 높이는 $1230mm$ 이며 최대폭 $255mm$, 최대 넓이 $280mm$ 이다. 또한 균형 관절의 총 무게를 약 $5Kg$ 으로 고려하더라도 전체 자중은 약 $50Kg$ 정도이다.

4.4 제어기의 구조

 이족보행로봇의 사절링크를 제어하기 위한 볼나사의 구동은 모터로 이루어진다. 이족 보행을 위해서 구동모터는 소형 DC 서보모터를 채용하였다. 아래의 Table 4.1 은 이족 보행로봇에 사용된 DC Servo Motor 의 사양이다.

Table 4.1 Specification of a DC motor for the biped walking robot

항목 \ 축	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	Right				Left				Balance	
	Foot (Roll)	Ankle	Knee	Pelvis	Foot (Roll)	Ankle	Knee	Pelvis	Pitch	Roll
DC Servo Motor	80W	80W	80W	80W	80W	80W	80W	80W	80W	80W
Encoder Resolution (2상)	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000
positive to negative limit[pulse]	30000	269800	251300	525900	30000	268700	251000	522600	21000	21000
pulse over lead [pulse/mm]		4800	1920	4800		4800	1920	4800		
positive to negative limit[mm]		56.208	130.885	109.562		55.979	130.729	108.875		
pulse over angle [pulse/deg]	1200				1200				700	700
positive to negative limit[degree]	25.0				25.0				30.0	30.0

모터의 구동를 제어하기 위하여 상용화 되어있는 모션 제어기를 이용하였고, 로봇의 보행을 위한 상위 제어기로는 펜티엄급 PC를 사용하였다.

 본 연구에서 개발하는 10 자유도 이족보행로봇 기구부의 구성은 다음과 같다.

- 볼 나사를 채용한 사절링크 구조의 관절로 이루어진 다리부분의 6 축
- 발의 Roll을 담당하는 감속기가 부착된 Motor를 직접 연결한 2 축의 회전관절

- 균형을 잡기 위하여 감속기가 부착된 Motor를 직접 연결한 두 개의 회전관절

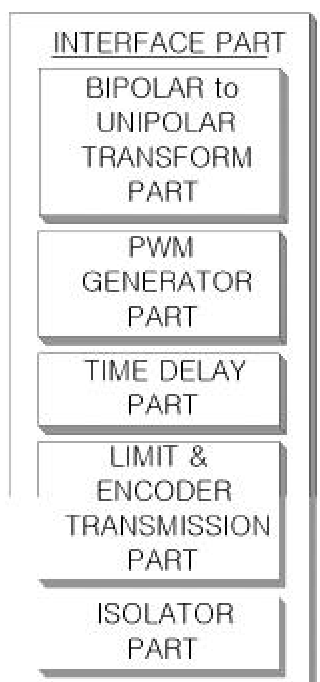
이러한 메카니즘을 전기 전자적으로 구동하기 위한 제어부는 아래와 같이 구성된다.
- 상용화되어있는 Motion 제어기(MMC-PV8)
- 자체 제작된 인터페이스 부분
- 자체 제작된 Motor Drive 부분
- DC Servo Motor
- Limit Sensor

제어부에 있어서 MMC(Multi motion controller) 제어기의 사양은 Table 4.2 와 같고, 자체 Memory를 1k Byte(DPRAM) 내장하고 있어 상위제어기와의 보다 빠른 고속통신을 할 수 있다. 그리고 축 제어는 Proportional-Integral-Derivative-Feed forward (PIDF)제어 Loop를 구현한다.

인터페이스와 드라이버 부분에서, 인터페이스 부분의 구조는 Fig 4.3 과 같다.

Table 4.2 Specification of MMC PV-8

항 목	사 양
CPU	TMS320C31
Sampling Rate	1 msec
Analog 출력	±10V, 12bit 분해능
Analog 입력	4채널, 12bit 분해능 32μsec conversion rate
동작범위	32bit
사용자 I/O	TTL Level 각 32점
Limit Sensor 입력	32점
System I/O	16점
지원 OS	DOS , WIN3.1 , WIN95/98 , WIN NT , LYNX



여기서 Bipolar to Unipolar Transform Part는 Bipolar 속도명령을 Unipolar 속도명령과 방향전환신호로 변환하는 부분으로 Fig 4.4 와 같이 구성된다.

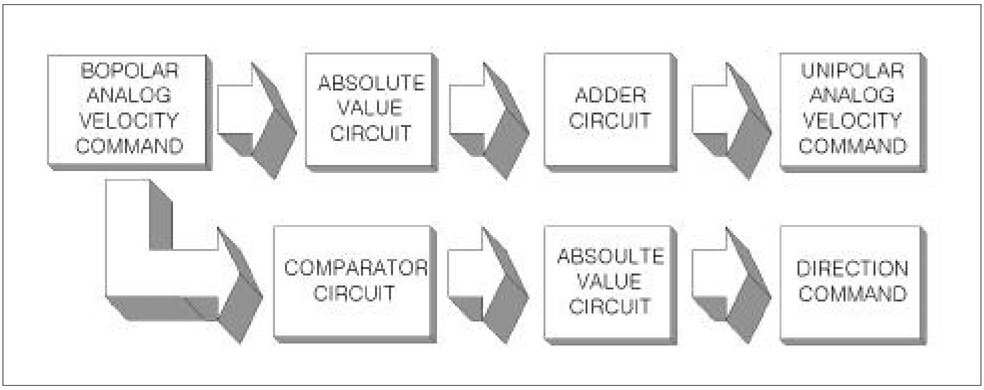


Fig 4.4 transformation of Bipolar to Unipolar

PWM(Pulse width modulation) generator part는 OP-Amp를 이용하여 삼각파와 Bipolar to Unipolar Transform part에서 발생한 Unipolar 속도명령을 비교하여 PWM 신호를 발생한다.

DC 모터 제어에서는 기본적으로 구동 및 정지 시에 속도의 가/감속 및 정/역 전환 시의 Time delay와 전원분리가 필수적이다. Time delay part는 이러한 시간지연을 위한 부분으로 Monostable Multivibrator를 이용하여 가변저항으로 지연시간을 결정할 수 있게 제작되었다. 이러한 구성은 고 부하를 받고 있는 DC 모터의 제어에는 반드시 있어야 할 부분이다. 또한 Encoder 신호와 Limit sensor 신호를 MMC 제어기에 전달하는 Limit & Encoder transmission part를 구성하였다.

Isolator part는 시스템에서의 노이즈나 큰 부하로 인해 모터의 구동 시 발생하는 고 전류의 역류를 방지하기 위한 부분으로서 상위제어기와 모션 제어기 그리고 제작된 인터페이스 부분의 안정성을 고려하여 Photo-Coupler 로 구성되었다.

Motor Drive는 DC 서보 모터에 직접적으로 전류를 공급하는 부분으로 전력소자의 방열과 전원분리가 필요한 부분이다. 전원분리는 전력소자의 효율을 높이기 위하여 반드시 필요하다. 본 연구에서는 로봇의 자율보행을 목적으로 하기 때문에 자체 동력원을 가진다. 따라서 전원분리는 비교적 고가인 DC to DC Converter를 사용하지 않고 소 용량의 동력원을 여러 개 사용함으로서 이를 대체할 수 있다. 이러한 기구 부와 제어부 및 상위 제어기의 전체 시스템 구성은 Fig 4.5 와 같이 구성된다.

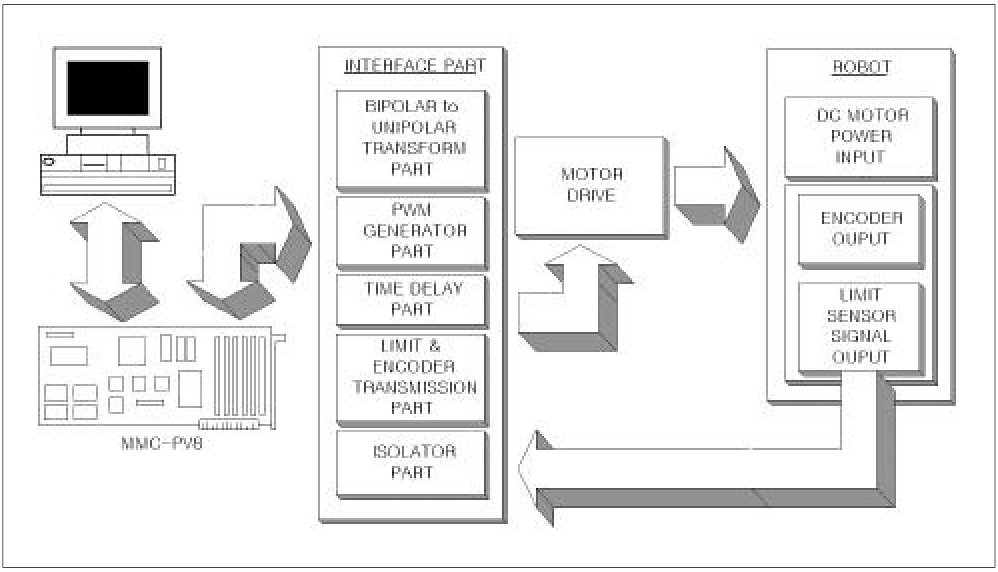
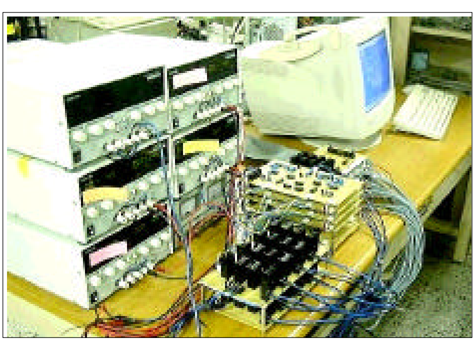
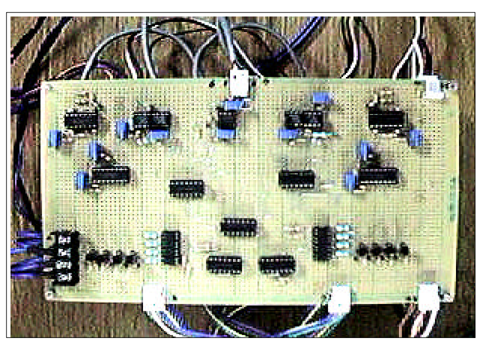


Fig 4.5 Block diagram of The total system

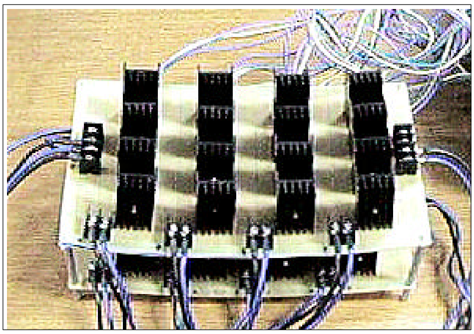
전원공급장치인 DC 서보 모터의 드라이브와 더불어 제어기와 드라이브를 연결하는 인터페이스 부분은 Pic 4.4 ~4.7 과 같이 직접 제작하였다.



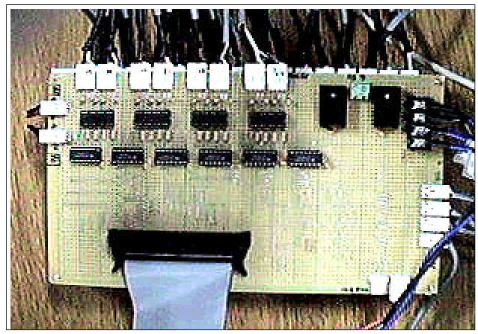
Pic 4.4 Control System of The biped walking robot



Pic 4.5 Interface part



Pic 4.6 Motor Drive part



Pic 4.7 Signal process of Encoder

이족 보행로봇에 대한 관절의 구동형태에 대하여, 이전의 하모닉 드라이버나 RV 감속기를 장착한 형태가 아닌 사절링크를 이용한 고 강성 및 고 토크를 가진 볼나사 구동기 형태의 새로운 기구적 메커니즘을 개발하였다. 이와 아울러 직접적으로 제작한 Motor Drive와 Interface장치와 같은 전기, 전자 및 제어 부를 위의 Fig 4.5 와 같이 결합함으로써 로봇의 크기 및 강성의 한계와 같은 이전의 한계를 벗어나 인체의 크기와 비슷하며 또한 외관도 사람의 관절구조와 흡사한 구조로서 고 강성 및 고 토크를 획득할 수 있는 보다 발전된 형태의 이족보행로봇을 개발할 수 있게 되었다.

V. 결론 및 향후 연구방향

본 연구에서는 기존의 개발된 이족보행로봇의 토크와 안정성의 한계점을 극복하기 위하여 사절링크를 이용한 고 강성, 높은 토크 변화율을 갖는 볼 나사를 이용하는 사절링크 구조의 관절 구동기를 채용한 인체형 10자유도 인체형 이족 자율보행로봇을 개발하였다. 이러한 이족보행로봇이 가지는 기구학적, 물리적 운동특성을 고려하여 수학적 모델을 도출하였다. 제안된 모델은 기존의 이족보행로봇의 회전 관절공간 상의 해석 형태가 아니라 사절링크에 볼나사를 채용한 형태의 관절형태를 제안함에 따라 사절링크의 기구학 및 동력학 식을 이용하여 볼나사 구동의 미끄럼관절 공간상의 기구학 및 동역학 식으로 변환하였고, 회전공간상의 제어입력인 토크도 미끄럼공간의 볼나사 구동력으로 변환하여 볼나사 공간의 운동방정식으로 변환하였다. 제안된 모델의 타당성을 검증하기 위하여 전방보행에 대한 Pitch운동을 하는 7 자유도의 운동방정식에 대한 컴퓨터 시뮬레이션을 행하였다. 시뮬레이션의 목적은 완성된 보행 알고리즘을 구현하기에 앞서 기본이 되는 각 회전 관절공간의 운동과 볼 나사의 미끄럼 관절공간 운동 사이의 관계에 대한 결과를 실제적으로 의도한 바와 일치하는 지 알기 위함이다.

이러한 운동 방정식의 모델링에 대한 검증을 위하여 외력 F_i 는 가하지 않고 중력항만을 고려했으며 지면에 대한 반발력은 고려하지 않은 7 자유도 매니퓰레이터로 가정하였다. 기구의 연쇄적 반응에서 나타난 각 관절링크의 동작형태는 폐쇄형 기구연쇄에서 서로 다른 축을 중심으로 종속적으로 회전하는 물체에 존재하는 코리올리스 힘과 같은 간섭 항 및 관성력 등에 대한 정보를 담고 있다. 또한 움직임의 형태도 중력방향으로 자유 운동하는 매니퓰레이터의 움직임과 유사함을 알 수 있다. 따라서 만족할 만한 결과를 얻었으며 향후 제어기의 부착 및 지면의 반발력에 대한 Z.MP (zero moment point) 등을 부착하여 완성된 보행알고리즘을 구현할 수 있는 기본적인 요소를 획득하였다.

위의 이론적 연구와 아울러 실 시스템의 보행을 목적으로 하는 메커니즘 설계와 실험적 연구방법을 수행하였다. 이를 위하여 Motor Drive와 인터페이스 장치를 직접 제작하였다. 인간 보행 시 연속적으로 움직이는 각 회전 관절들의 각 변화 데이터를 파악하고, 이를 응용하여 로봇이 안정되게 보행할 수 있는 시간 간격 및 로봇의 안정성을 고려한 보폭의 크기를 최대한 줄여 실제적인 보행실험을 수행하였다. 이족보행로

봇에 채용한 사절링크 구조의 관절 구동기는 위의 실험 결과, 소 용량의 DC Motor를 이용함에도 불구하고 만족할 만한 토크와 강성을 보여주었다. 본 연구와 개발의 결과로 볼나사를 이용한 이족보행로봇 및 다족 보행로봇의 구동기 설계기술 및 제어 기술을 확보할 수 있었다.

향후 과제로는 좌우방향에 대한 3 자유도의 운동방정식에 대한 모델링과 Z.MP와 같은 균형운동 및 전 10축에 대한 보행 알고리즘을 개발 하고자 한다. 이족보행로봇은 구동 특성 상 두 개의 극단적인 부하조건을 가지고 있다. 하나는 다리부의 하중만 부하로 작용하는 유각의 경우와 유각의 하중 및 균형관절의 하중까지 부하로 작용하는 지지각의 경우가 그것이다. 두 경우 부하의 차이는 2배 이상의 크기이며 또한 보행 시간이 단축될수록 변환 시간도 일반적인 로봇 매니퓰레이터와 같이 점진적으로 변하지 않고 단 시간 내에 변화를 이루게 된다. 이러한 급격한 변환은 각 관절에 충격력으로 작용함을 알 수 있다. 따라서 이러한 단점의 보완 및 강인성 부여를 목적으로 강인한 구조적 형태 및 적합한 제어 알고리즘의 개발이 요구된다. 이러한 연구들과 함께 계단 등의 인간의 생활 및 주거환경 등에서 작업할 수 있도록 많은 보행실험을 수행하고, 이때 발견되는 여러 문제점들을 개선하여 보다 향상된 이족보행로봇 시스템을 개발하고자 한다.

VI. 참고 문헌

[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. Leslie Golliday, Hooshang Hemami, "An Approach to Analyzing Biped Loco-motion 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] Kenneth J. Waldron, "Realization of Dynamic Biped Walking Stabilized with Trunk Motion Under Known External Force." Advanced Robotics, pp.299-310, 1989.

[10] A. Takanishi, Y. Egusa, M. Tochizawa, M. Takeya, and I. Kato, "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.

[11] P.H. Channon, S.H. Hopkins, D.T. Pham, "Derivation of optimal walking motions for a bipedal walking robot," ROBOTICA, pp. 165-171, 1991.

[12] Jin-ichi YAMAGUCHI, Astuo TAKANISHI, and Ichiro 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.

[13] Y. Fujimoto, A. Kawamura, "Three Dimensional Digital Simulation and Autonomous Walking Control for Eight-Axis Biped Robot", IEEE International Conference on Robotics & Automation, pp. 2877-2884, 1995

[14] J. Yamaguchi et al., "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.

[15] J. Yamaguchi et al., "Development of a Biped Walking Robot Adapting to a Horizontally Uneven Surface.", Proceedings of the 1994 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS'94), pp.1156-1163, 1994.

[16] Sun-Ho Lim and Jin-Geol Kim, "Biped Locomotion with Mechanical Compliance.", (In Korean) Korea Robotics and Automation Workshop Conference, pp.21-25, 1992.

[17] 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.

[18] G. Z. Tan, "Study on Mechanics Laws for Anthropomorphic Biped Robots to Walk Dynamically on Sloping Surface", Proceedings of the 1996 IEEE International Conference on Robotics & Automation, pp. 252-257, 1996

[19] M Filipe M J.A. Silva, T. Machado, "Towards Efficient Biped Robots". Proceedings of the 1998 IEEE/RSJ Intl. Conference on Intelligent Robots and Systems", pp. 394-399, 1998

[20] Keon Young Yi, "Walking of a Biped Robot with Compliant Ankle Joints", KACC, pp.245-250, 1998.

[21] Ching-Long Shin, "Analysis of the Dynamics of a Biped Robot with Seven

Degrees of Freedom.", IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp.3008-3013, 1996.

[22] Seiichi Miyakoshi, Gentaro Taga, Yasuo Kuniyoshi, Akihiko Nagakubo, "Three Dimensional Bipedal Stepping Motion using Neural Oscillators - Towards Humanoid Motion in the Real World". Proceedings of the 1998 IEEE/RSJ Intl. Conference on Intelligent Robots and Systems, pp. 84-89, 1998

[23] C. Chevallereau, A. Formal'sky, B.Perrin, "Low Energy Cost Reference Trajectory for a Biped Robot", Proceedings of the 1998 IEEE International Conference on Robotics & Automation, pp. 1398-1404, 1998

[24] Jong H. Park, Young K. Rhee, "ZMP Trajectory Generation for Reduced Trunk Motions of Biped Robots", Proceedings of the 1998 IEEE/RSJ Intl. Conference on Intelligent Robots and Systems, pp. 90-95, 1998

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

[26] M Yamada, J. Furusho, A. Sano, "Dynamics Control of Walking Robot with Kick-Action.", ICAR, pp.405-412, 1985.

[27] Eric R. Dunn, Robert D. Howe, "Toward Smooth Bipedal Walking.", IEEE, pp.2489-2494, 1994.

[28] S. Kajita and K. Tani, "Experimental Study of Biped Dynamic Walking", IEEE Control System Magazine, Vol.16, No.1, pp.13 19, 1996.

[29] Toshio Fukuda, Youichiron Komata, Takemasa Arakawa, "Recurrent Neural network with Self-adaptive Gas for Biped Locomotion Robot.", IEEE, pp.1710 1714, 1997.

[30] Jianjuen Hu, Jerry Pratt, Gill 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

[31] K. Ohnishi, M Shibata & T. Murakami, "Motion Control for Adavanced Mechatronics.", IEEE/ASME Trans. on Mechatronics, Vol.1, No.1, pp.56 67, 1996.

[32] 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.

[33] Qinghua Li, Astuo Takanishi, and Ichiro Kato, "Learning Control for a Biped Walking Robot with a Trunk.", IEEE/RSJ Internal Conference on Intelligent Robots and System, pp.1771 1777, 1993.

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

[35] Jin'ichi Yamaguchi, Daisuke Nishino, Atsuo 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.

[36] Kazuo Hirai, Masato Hirose, Yuji Haidawa, Toru Takenaka, "The Development of Honda Humanoid Robot.", International Conference on Robotics & Automation Proc. of IEEE, pp.1321 1326, 1998.

[37] **임선호**, "**이족보행로봇** IWR-III**의 균형점 제어구현에 관한 연구**.", **인하대학교 대학원 논문집**, 1999

[38] **최형식**, **이호식**, **박용헌**. "**볼나사 구동기를 갖는 로봇다리의 모델링**.", **한국정밀공학회 춘계학술대회 논문집**, pp.583～585, 2000

감사의 글을 남기며...

새로운 희망에 대한 설레임과 앞으로의 개척해야할 삶에 대한 두려움을 간직한 채 대학교의 문턱을 처음 디딜 때가 기억납니다. 그리고 지금... 그 문턱을 넘어 새로운 세상을 향한 시작의 기로에 서 있습니다. 참으로 많은 것들을 얻었고 또한 잃었던 내 소중한 젊은 시절이었습니다...

학부 때부터 저에게 많은 영향을 주었고 또한 저에게 배움의 길을 열어주시고 지금까지 내가 있기까지 아낌없는 조언과 지도를 해주신 최 형식 교수님께 가슴 가득히 진심 어린 감사를 드립니다. 그리고 부족한 저의 논문을 정성어린 마음으로 다듬어주신 진 강규 교수님과 정 재현 교수님께도 감사의 마음을 드립니다. 아울러 지능기계공학부의 여러 교수님들에게도 감사드립니다.

항상 저와 함께 했던 지능로봇 및 자동화 실험실의 여러 학우들... 이족로봇 연구를 같이했던 용헌 형, 여러 부족한 부분을 채워주었던 대원, 영식 형 그리고 언제까지나 함께 할 사람들인 경식, 정민, 유신, 창열, 정재, 창훈.. 모두들 정말 고마운 이름들입니다. 또한 실험장비에 있어서 많은 도움을 주었던 정형가공 실험실의 여러 학우들에게도 감사의 마음을 전합니다. 로봇 제작에 있어서 많은 도움을 주었던 로보테크의 강 삼태 사장님, 피코 시스템의 한 종석 선배님에게도 감사드립니다.

저의 대학생활에 있어서 또한 중요한 부분이었던 동아리 생활... 한국해양대학교 산악부는 저에게 도전과 젊음의 열정을 느끼게 해 준 곳입니다. 흰눈 내리는 설악산에서 때로는 뜨거운 태양아래서의 인수 봉까지 언제나 함께 있었던 내 岳友인 여러 산악부 선배님들 그리고 고마운 후배 환세와 덕교에게 감사의 마음을 전합니다. 또한 비록 같은 공간에서 함께 하지는 못했지만 저에게 많은 위로와 힘이 되어주었던 주위의 여러 친구들에게도 감사의 마음을 함께 전합니다.

내가 가장 사랑하는 가족들... 그들은 저에게 있어서 언제나 위안이 되었고 안식처였습니다. 작은누나와 매형 그리고 외 조카 경빈이와 경진이... 그들의 앞으로의 삶에서 언제나 기쁨이 충만하기를 바랍니다. 그리고 큰누나, 형님... 마지막으로 제가 이 세상에 빛을 보게 하시고, 지금까지 어느 누구보다도 제가 가장 사랑하는 아버님, 어머님께 진정 어린 감사의 마음을 드립니다... 영원히 사랑합니다...

새 천년의 벽두에서...희망을 가득 품고　　이 호식 드림