

공학석사 학위논문

12 자유도 이족보행로봇의 설계 및 동역학
해석

Design and Dynamic Analysis of Biped Walking Robot

with 12 D.O.F

지도교수 최 형 식

2006 년 2 월

한국해양대학교 대학원

기 계 공 학 과

오 주 환

本 論文을 吳柱煥의 工學博士 學位論文으로 認准함.

위원장 왕지석 (인)

위 원 최형식 (인)

위 원 조종래 (인)

위 원 (인)

위 원 (인)

2006 년 1 월 2 일

한국해양대학교 대학원

목 차

Abstract.....	iii
기호설명.....	v
그림목차.....	vii
표목차.....	x
제 1 장 서론.....	1
제 2 장 12자유도 이족보행로봇 하체의 구성.....	4
2.1. KUBIR-2의 전체 시스템	6
2.2. 하체골반 관절의 기구부 구성.....	9
2.3. 로봇발의 기구부 구성.....	10
2.4. 로봇의 관절 구동기의 설계.....	12
제 3 장 이족보행로봇의 기구학 및 동역학 해석.....	15
3.1. 로봇 하체의 기구학 해석.....	15
3.2. 자코비안.....	21
3.3. 이족보행로봇의 동역학 방정식 유도.....	24
3.4. 회전관절 공간의 로봇 동역학식.....	28
3.5. 회전관절과 직선관절의 관계식.....	34
3.5.1 골반 회전관절과 직선관절 간의 관계식.....	35
3.5.2 무릎 회전관절과 직선관절 간의 관계식.....	37
3.5.3 발목 회전관절과 직선관절 간의 관계식.....	38

3.5.4 적선운동 관절 공간에서의 제어입력.....	40
3.5.5 적선관절 공간의 동역학식.....	41
3.6. 시뮬레이션.....	42
제 4 장 로봇의 관절 구동기 해석.....	53
4.1. 사절링크 불나사 공간의 구동기 부하토크 해석.....	53
4.2. 사절링크 구동기의 성능시험.....	59
제 5 장 결론.....	66
참고문헌.....	68

Design and Dynamic Analysis of Biped Walking Robot with 12 D.O.F

Ju – Hwan Oh

Department of Mechanical Engineering
Graduate School, Korea Maritime University

Abstract

In this paper, design modification was performed to improve the structure of ex-developed 12 D.O.F walking robot, KUBIR-1 similar with human beings. The motion of KUBIR-1 was slow and had a limited walking space. Hence I designed an improved BWR named KUBIR-2 with 12 degree of freedom.

KUBIR-2 was designed to solve the following problems of KUBIR-1. First, KUBIR-2 was more simply designed in the four-bar-link mechanism, and its weight was reduced. Second, it had the built-in controller and motor driver. Third, walking velocity of KUBIR-2 was increased by improvement of speed and motion joint angle range. In addition to these, we modified the structure of the foot for more stable walking.

The torque analysis was performed acting on the joint of robot by modeling the kinematics and dynamics of the robot. Load torque of the joint actuator was analyzed for forward walking motion, and was compared

with theoretic analysis. Through the experiment, the theoretic analysis on the torque performance of joint actuators was verified.

기 호 설 명

Γ	일반화 힘(generalize force)
K	매니플레이터에 작용하는 총 운동에너지
m_i	회전링크 i 의 질량
V	매니플레이터에 작용하는 총 포텐셜에너지
L	Lagrangian($L = K - V$)
$S(\overline{\omega})$	왜대칭 행렬(skew symmetric matrix)
I_i	링크 i 의 관성 모멘트(inertia moment)
J_{vci}	링크 i 의 선속도 자코비안(Jacobian)
$J_{\omega i}$	링크 i 의 각속도 자코비안
D	회전 관절 공간에서의 관성 행렬
C	회전 관절 공간에서의 원심력과 코리올리(Coriolis)력
Φ_i	기저 좌표계에 대한 링크 i 의 위치에너지
O_i	기저 좌표계에 대한 각 관절 i 의 회전 중심
M_{X_i}	기저 좌표계를 기준으로 한 각 회전링크의 질량 중심
M_{Y_i}	기저 좌표계를 기준으로 한 각 회전링크의 질량 중심
q_i	회전관절 i 의 관절 변위
l_i	회전 링크 i 의 길이
l_{ci}	회전 링크 i 의 질량 중심 거리

d_i	각 관절의 볼나사의 미끄럼변위
F_i	각 관절에 가해지는 미끄럼 방향의 힘
τ_i	각 관절의 회전중심에 작용하는 토크
H	미끄럼 관절 공간에서의 관성행렬
Q	미끄럼 관절 공간에서의 원심력 및 코리올리력
M_i	각 관절 구동기에 작용하는 자중
$\tau_{Motorload,i}$	각 관절 구동기에 축방향으로 작용하는 외력에 대한 모터의 부하 토크

그림 목 차

Fig. 2.1 Previous structure of the KUBIR-1.....	5
Fig. 2.2 Structure of the KUBIR-2.....	5
Fig. 2.3 Photograph of the KUBIR-2.....	6
Fig. 2.4 System composition of the KUBIR-2.....	8
Fig. 2.5 3D model of the waist.....	9
Fig. 2.6 Photograph of the wais.....	10
Fig. 2.7 3D model of the foot.....	11
Fig. 2.8 Front view of the foot.....	11
Fig. 2.9 Side view of the foot.....	11
Fig. 2.10 3D model of the 2axis actuator.....	13
Fig. 2.11 Structure of the 2axis actuator.....	14
Fig. 2.12 Structure of the 1axis actuator.....	14
Fig. 2.13 Front view of the ankle actuator.....	14
Fig. 2.14 Side view of the ankle actuator.....	14
Fig. 3.1 D-H coordinate frame assignment for the lower body.....	17
Fig. 3.2 Mass model of the KUBIR-2.....	26
Fig. 3.3 Kinematics model of the lower body.....	27
Fig. 3.4 Four-bar-link structure for thigh joint.....	35
Fig. 3.5 Four-bar-link structure for knee joint.....	37

Fig. 3.6 Four-bar-link structure for ankle joint.....	38
Fig. 3.7 Motional variation of the robot.....	43
Fig. 3.8(a) Trajectory of the ballscrew in thigh joint.....	46
Fig. 3.8(b) Velocity of the ballscrew in thigh joint.....	46
Fig. 3.8(c) Acceleration of the ballscrew in thigh joint.....	46
Fig. 3.8(d) Control input of the ballscrew in thigh joint.....	47
Fig. 3.9(a) Trajectory of the q_1	47
Fig. 3.9(b) Angular velocity of the q_1	47
Fig. 3.9(c) Angular acceleration of the q_1	48
Fig. 3.10(a) Trajectory of the ballscrew in knee joint.....	48
Fig. 3.10(b) Velocity of the ballscrew in knee joint.....	48
Fig. 3.10(c) Acceleration of the ballscrew in knee joint.....	49
Fig. 3.10(d) Control input of the knee joint.....	49
Fig. 3.11(a) Trajectory of the q_2	49
Fig. 3.11(b) Angular velocity of the q_2	50
Fig. 3.11(c) Angular acceleration of the q_2	50
Fig. 3.12(a) Trajectory of the ballscrew in ankle joint.....	50
Fig. 3.12(b) Velocity of the ballscrew in ankle joint.....	51
Fig. 3.12(c) Acceleration of the ballscrew in ankle joint.....	51
Fig. 3.12(d) Control input of the ankle joint.....	51
Fig. 3.13(a) Angular velocity of the q_3	52
Fig. 3.13(b) Angular velocity of the q_3	52

Fig. 3.13(c) Angular acceleration of the q_3	52
Fig. 4.1 Torque analysis of the ankle joint	54
Fig. 4.2 Torque analysis of the knee joint.....	55
Fig. 4.3 Torque analysis of the thigh joint.....	55
Fig. 4.4 Load torque of the ankle joint	57
Fig. 4.5 Load torque of the knee joint.....	57
Fig. 4.6 Load torque of the thigh joint.....	58
Fig 4.7 System composition of the current test.....	59
Fig 4.8 Current data.....	61
Fig 4.9 Torque of the thigh joint.....	62
Fig 4.10 Torque of the thigh joint using max current.....	63
Fig 4.11 Relation of the thigh joint torque and ballscrew force	64

표 목 차

Table 3.1 Link parameter for the lower body	18
Table 3.2 Material properties for the thigh joint.....	44
Table 3.3 Material properties for the knee joint.....	44
Table 3.4 Table 3.3 Material properties for the ankle joint.....	44
Table 3.5 Material properties for the KUBIR-2.....	45
Table 4.1 Constants of the load torque in each joint.....	56
Table 4.2 Test of the result.....	62
Table 4.3 Result of using max current.....	63
Table 4.4 Result of replacing ballscrew.....	64

제 1 장 서 론

현재까지 공장에서 인간을 대신하여 작업을 수행하던 로봇들은 인간의 생활 및 공장자동화에 지대한 영향을 미치고 있었다. 그러나 산업용 로봇의 포화상태에 따라 기존의 산업용 로봇보다 인간생활에 보다 쉽게 접근할 수 있는 로봇들이 새로운 대세로 인정 받고 있고 있으며 그중 하나가 이족보행로봇이다.

인간을 모방한 휴머노이드(Humanoid)는 상용화가 2020년 이후로 예상되고 있으나 기술발전에 대한 상징성이 매우 크고 현재 사람들이 생활하고 있는 생활공간에서 문턱, 층계 및 경사면과 같은 복잡한 환경에 직접 투입하여 활용할 수 있다. 그리고 인간과 동일한 외형을 갖추고 있어 인간 친화적인 서비스를 제공할 수 있다는 측면에서 로봇개발을 위한 노력이 전세계적으로 지속되고 있다. 로봇 보행 기술의 연구는 60년대 후반 Vucobratovic가 이족보행로봇에 관한 모델링을 제안한 이후 이족보행로봇에 대한 많은 연구가 수행되었다. 동적 보행 시에 로봇의 걸음새 동작의 특성을 파악하고 이를 제어하는 연구[1,2], 3자유도 이족보행로봇의 토크를 줄이기 위하여 경로 계획을 이용한 제어[3], 5자유도의 이족보행로봇의 운동방정식을 비선형 디커플링 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 연구들 수행되었다[7,8].

현재 휴머노이드 연구에 있어서 선도적인 위치를 점하고 있는 나라는 일본이다. 혼다(Honda)를 비롯한 소니(Sony), 후지쓰(Fujitsu), 도요타(Toyota) 등의 기업, AIST, 동경대, 와세다대 등의 연구소 및 대학에 이르기까지 폭넓은 휴머노이드 연구가 활발히 진행되고 있다. 일본의 혼다는 1986년부터 이족 보행이 가능한 휴머노이드 개발에 착수하여 1996년 말에 이족 보행 휴머노이드인 P2를 발표하였고 2000년에는 ASIMO를 발표하였다[14~17]. P2는 세계 최초의 자율이족보행 휴머노이드이다. 현재 한국에서도 휴머노이드로봇의 개발이 활발히 이루어지고 있으며 대표적인 예로 KISIT의 휴보와 고강성 및 고평크에 중점을 둔 KUBIR를 들 수가 있다. 일본 동경대의 이노우에 교수의 실험실에서 최근에 개발된 휴머노이드로봇 H6 와 H7, Sony는 2000년부터 이족 보행이 가능한 소형 휴머노이드를 개발하여 왔고, 결과물로서 SDR(Sony Dream Robot) 시리즈와 최근의 Qrio 등을 선보였다. 또한, 독일의 TUM에서 개발한 휴머노이드로봇 Johnnie가 있다. 그러나, 보행로봇은 다자유도 시스템의 운동방정식의 복잡성으로 수학적 모델의 정립이 어렵고 이로 인하여 다양한 걸음새를 구현하기에는 제한적이었다. 이론적 모델링을 통한 접근방법과는 달리 보행을 위한 구동 메커니즘의 설계와 실험적인 방법으로 접근한 연구들도 있다. 하지만, 모터와 감속기를 이용한 구동기 설계와 제작은 구동모터의 구동토크 한계와 감속기의 강성의 한계로 구동 토크 변화율의 한계 및 로봇의 크기에 제한을 둘 수밖에 없는 구조적 한계점을 가지고 있다[9~13].

본 논문에서는 기존의 개발된 KUBIR-1의 문제점을 보완하여 보다 안정된 보행과 인간과 유사한 형태의 구조로 개선하기 위하여 새로운 형태의 12자유도 하체(KUBIR-2)를 개발하였다. 기존에 연구되던 KUBIR-1은 새로운 형태의 이족 보행로봇으로써 보행 로봇 발전에 큰 기여를 하였으나 과중한 자체 중량과 낮은 보행 속도 그리고 좁은 관절 운동반경을 가지고 있었다. 따라서 인간과 같은 유연한 보행을 할 수 없었다. 또한 구동기 및 제어기기의 복잡한 구성으로 인하여 구동 메커니즘 및 걸음새 구현이 제한적이었다. KUBIR-2는 구동기 부분의 모듈화를 수행하였으며 대대적인 경량화 및 구동속도의 향상, 그리고 디자인작업을 수행하여 총 12자유도의 로봇 하체를 개발 하였다. 따라서 본 논문의 2장에서는 개발된 로봇 기구부의 구성 및 제원에 대하여 설명하고 KUBIR-2의 전반적인 성능향상을 설명하였다. 3장에서는 KUBIR-2의 기구학 해석 및 동역학 해석을 수행하여 보행에 따른 동역학 방정식을 유도하였다. 또한 유도된 방정식의 컴퓨터 시뮬레이션을 수행함으로써 로봇하체의 각 관절에 걸리는 토크를 해석하였고 사용된 모터의 타당성 및 고용량의 작업을 할 수 있는 로봇임을 검증하고자 하였다. 4장에서는 개발된 로봇 구동기의 일반적인 방정식을 유도하였으며 전방보행시 다리의 각 관절에 사용된 구동기의 부하토크를 해석하여 이론과 실제적용의 타당성을 검증하고자 하였다. 또한 실제로 로봇 구동기에 하중을 부과하는 구동 전류시험을 수행하였다. 전류시험은 부하에 따른 구동 전류의 측정으로 수행되었으며 구동기의 실제 성능을 평가하고 최대 성능을 예측하였다. 마지막으로 5장에서는 결론 및 향후 과제에 대하여 논하였다.

제 2 장 12자유도 이족보행로봇 하체의 구성

새로운 로봇의 모태가 된 KUBIR-1은 여러 가지 문제를 가지고 있었다. KUBIR-1은 사절링크를 이용한 로봇으로 고강성 및 고토크의 구동기를 가지고 있었지만 인간처럼 보행하기에는 저속이었으며 사절링크의 특성상 복잡한 구조를 가지고 있었다. 또한 관절들의 좁은 운동 반경은 유연한 보행에 장애가 되었다. Fig. 2.1은 KUBIR-1의 조립도 이다. KUBIR-1은 신장 170cm에 92kg의 중량을 가진 이족보행로봇으로써 세계적으로 몇 안 되는 대용량의 로봇이다. 따라서 KUBIR-1은 자체크기와 중량을 소화해내는 우수한 성능의 구동기를 가진 로봇으로써 평가 할 수 있다. 그러나 Fig. 2.1 에서 볼 수 있듯이 전체적으로 불균형한 형태를 지니고 있으며 하체에 비해 과중한 상체를 가지고 있음을 확인 할 수 있다. Fig. 2.2는 새롭게 설계된 KUBIR-2의 조립도 이다. 현재 하체 12자유도만 개발 된 상태 이며 기존의 로봇과 같은 4절 링크 구동기로 설계 되었다. 그러나 보다 더 간단한 구조를 가지고 있으며 인간과 같은 비례의 다리를 지니고 있으므로 균형잡인 형태를 가지고 있다. 또한 외장설계로 배선 및 제어기를 구동기에 내장하여 단일 구동기에 대한 단일 제어기를 가지는 구동기의 모듈화에 성공하였다. Fig. 2.3는 설계된 로봇의 실제사진으로써 보행에서 많은 문제가 되었던 배선 및 제어모듈이 내장된 모습을 볼 수 있다.

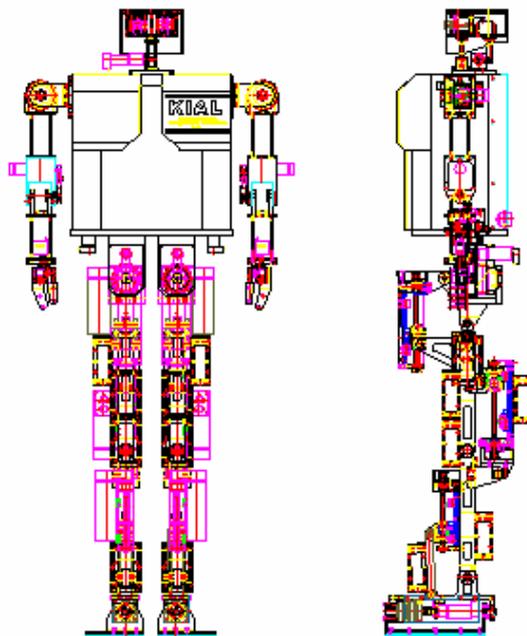


Fig. 2.1 Previous structure of the KUBIR-1

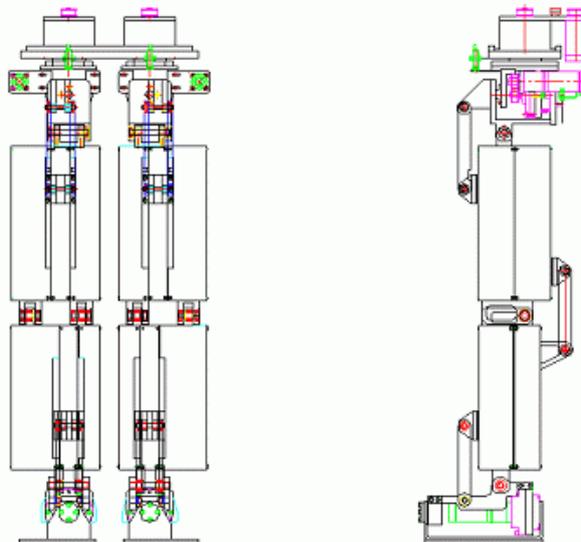


Fig. 2.2 Structure of the KUBIR-2



Fig. 2.3 Photograph of the KUBIR-2

2.1 KUBIR-2의 전체 시스템 구성

새로이 설계된 KUBIR-2의 전체 시스템 구성은 Fig. 2.4 과 같다. KUBIR-2는 신장 120cm, 중량은 48kg이며, 총 12자유도를 가지는 휴머노이드 로봇이다. 기본적으로 과하중을 받는 발바닥 부분을 제외하고 알루미늄 6000계열을 이용하여 설계하였으며 기존로봇의 하체(KUBIR-1) 중량이 68kg인 것에 비하면 대대적인 경량화에 성공한 것을 알 수 있다. Fig. 2.4와 같이 KUBIR-

2는 3D 기반에서 설계되어 중량설계가 가능하였으며 각 관절의 운동반경과 외장 디자인을 융통성 있게 설계하였다. KUBIR-2의 각 관절은 균형관절, 허벅지관절, 무릎관절, 발목관절로 나눌 수 있으며 회전관절, 균형관절에 해당하는 DC모터와 감속기가 폴리-타이밍벨트 타입으로 부착되어 있어 요(yaw), 롤(roll) 운동이 가능하다. 그리고, 하체 중 발 부분을 제외한 나머지 관절에는 모터 직결이 아닌, 4절 링크의 볼나사 구조이어서 피치(pitch) 운동만 할 수 있다. 관절 구동기의 4절링크 부분은 LM가이드 및 볼나사를 최적 배치 하여 보행에 적합한 운동반경을 얻어 낼 수 있도록 하였다. 발 부분에는 DC모터와 HAMINIC DRIVE 가 직결 타입으로서 롤(roll) 운동이 가능하다. 각 관절에 사용된 모터와 감속기는 중량에 비해 최대한 성능을 발휘 할 수 있는 모델로 선정 되었으며 DC 모터의 용량은 150W, 하모닉드라이브는 160:1을 사용하였다.

KUBIR-2는 상업용 로봇 제어기를 쓰지 않고 자체 개발된 제어 시스템을 사용하고 있으며 상위 제어기인 32bit 프로세서인 ARM 보드를 사용하여 임베디드 시스템을 구현하였다. ARM 보드는 로봇의 전체적인 구동 방식을 제어하고 있으며 각각의 구동기에는 하위 제어기인 TMS320LF2407A 및 자체 개발된 모터 드라이브를 탑재하고 있으므로 개별적인 관절구동이 가능한 구동기의 모듈화에 성공하였다. 또한 KUBIR-2는 압전센서 및 가속도센서를 탑재하여 보행 중에 일어나는 로봇의 물리적 변화에 대처하여 피드백제어 할 수 있는 시스템으로 설계 되었다.

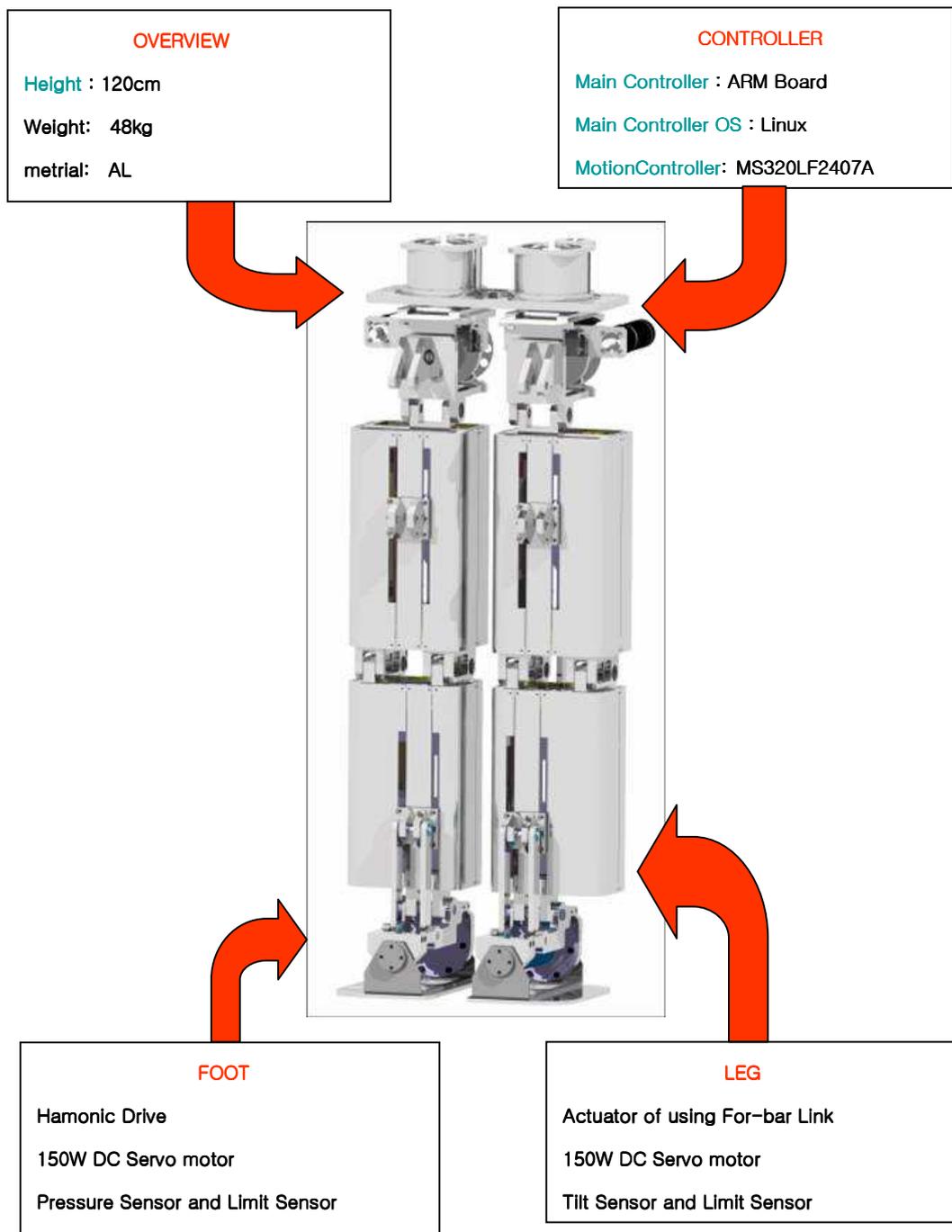


Fig. 2.4 System composition of the KUBIR-2

2.2 하체골반 관절의 기구부 구성

골반 관절은 보행시 로봇의 무게 중심이동과 방향전환에 영향을 미치는 매우 중요한 관절이다. 골반관절은 오른다리 롤운동, 오른다리 요운동, 왼다리롤운동, 왼다리 요운동을 하는 4자유도로 구성되어 있으며, 요운동을 하는 2자유도는 로봇의 회전을 담당하고, 롤운동을 하는 2자유도는 보행시 로봇의 균형을 담당하는 역할을 한다. 각각의 자유도는 4절링크가 아닌, DC모터와 감속기를 폴리-타이밍벨트 타입으로 체결하였으므로 토크의 증대를 위하여 높은 감속비를 가진 감속기를 채택하였다. 또한 균형관절부분에는 폴리비가 2:1 로써 출력축의 토크를 증가시켰다. Fig. 2.5는 골반관절의 3D 모델이며 Fig. 2.6은 실제 골반 관절의 정면사진이다.

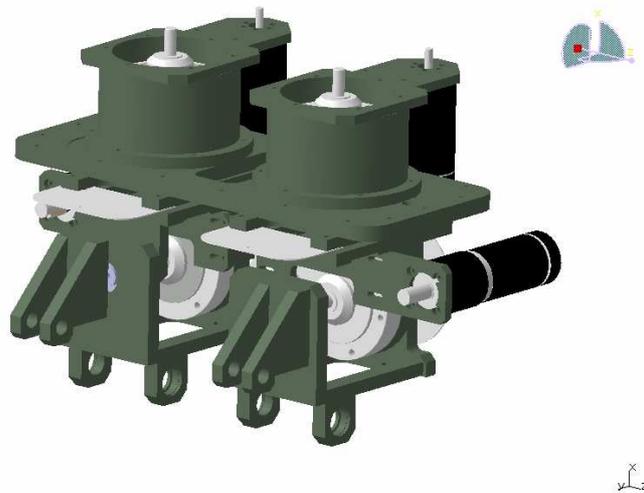


Fig. 2.5 3D model of the waist



Fig. 2.6 Photograph of the waist

2.3 로봇 발의 기구부 구성

로봇의 발은 톨운동하는 1자유도로 구성 되어있으며 로봇의 보행시 로봇의 균형을 담당하는 역할을 한다. 로봇발은 4절링크 구조가 아닌, DC모터와 커플링의 직결형태로 구성 되어있다. 발바닥은 로봇의 기구부 중에 가장 많은 하중이 걸리는 부분으로써 유일하게 알루미늄이 아닌 강(SS410)을 사용하였다. 로봇발은 로봇의 전체 하중을 지지하고 있으므로 강력한 토크를 필요로 하는 부분이지만 공간의 협소함으로 4절링크 구조를 사용할 수 없는 관절이다. 그러나 발의 특성상 저속의 구동조건 이므로 대용량의 감속기를 2단기어로 채택하였다. Fig. 2.7는 로봇발의 3D 모델링이며, Fig. 2.8, 2.9는 실제 로봇발의 정면 및 측면 사진이다. 그림에서 볼 수 있듯이 로봇발은 간단한 구조로 되어 있으며 상단에 모션제어기 및 드라이브를 탑재하고 있다. 발바닥은 조립식 구

조로 필요에 따라 얼마든지 탈 부착이 가능하므로 발바닥의 크기에 제안을 받지 않고 실험 할 수 있는 융통성 있는 구조로 설계되었으며 발바닥의 모서리 부분에는 압전센서를 4개 부착하여 보행시에 발바닥에 받는 하중을 받을 수 있게 설계되었다. 또한 롤운동 중에 나타날 수 있는 오작동 및 기구간의 충돌에 대비하여 리밋센서를 부착하여 로봇의 안정성을 확보하였다.

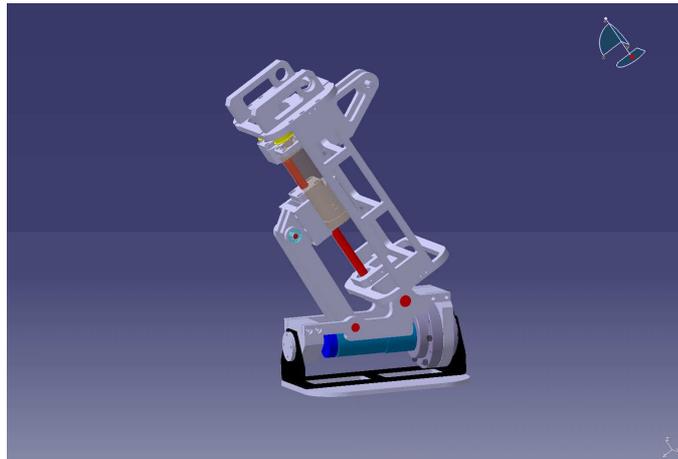


Fig. 2.7 3D model of the foot



Fig. 2.8 Front view of the foot



Fig. 2.9 Side view of the foot

2.4 로봇의 관절 구동기의 설계

KUBIR-2는 고강성 및 고토크의 이족보행로봇의 지향하고 있으므로 그에 걸맞는 관절 구동기의 개발은 필수적이다. 현재, 보행로봇을 비롯한 다관절 로봇의 관절구동기는 일본의 하모닉 드라이브로 독점적으로 유통하고 있으며 보행로봇의 관절구동기는 가격이 높고, 내구성이 현저히 떨어지는 문제점을 안고 있다. 따라서 이들에 보편적으로 사용할 수 있는 모듈형태의 소형, 경량 고토크 관절 구동기의 개발이 이루어졌다. KUBIR-2의 관절 구동기는 사절링 크의 한변을 강성이 높은 관절 볼나사를 적용하여 모멘트를 발생 시키는 방법으로 상대적으로 높은 관절구동력을 발생할 수 있는 장점과 볼나사의 용이한 교체로 관절 회전 속도를 상황에 맞게 다양하게 구성할 수 있는 장점이 있다. 이러한 기구부에 모터와 모터 드라이브 모듈을 구성함으로써 보행로봇에 용이하게 탈부착하여 사용할 수 있게 설계하였다. 볼나사는 강성과 정도가 매우 높으므로 DC모터와 직결 연결하여 사용되며, 구조에 따라 타이밍 벨트를 이용하여 융통성 있게 구성될 수 있다. 구동기는 1축 및 2축 구동기로 나눌 수 있으며 1축 구동기의 무게는 4kg, 2축 구동기의 무게는 7kg 이다. Fig. 2.10 은 내부공간확충 및 경량화를 위하여 3D모델링을 수행한 모습이며, Fig. 2.11, 2.12 는 1축 및 2축 구동기의 조립도면이다.

관절 구동기에는 제어용 드라이브가 필수적이다. 그러나 기존의 상용 모터 드라이브는 부피가 크고 중량이 무겁다. 따라서 보행로봇의 제어용 드라이브는 로봇의 중량에 부과되어 구동기의 부하로써 작용하게 된다. 그러므로 제어

기와 함께 구동 드라이브의 소형화 및 경량화는 필수적인 과제라고 할 수 있다. KUBIR-2의 구동기에는 2축 모션 제어기, TMS320LF2407A를 내장하고 있으며, 내장된 엔코더 카운더와 PWM(Pulse Width Modulation) 출력을 이용하여 한 장이 2축의 모터를 제어 할 수 있도록 설계되었다. Fig. 2.13 에서 1축구동기에 내장된 제어기의 모습을 볼 수 있다. 또한 자체 연구 개발된 모터 드라이브는 Fig. 2.14 와 같이 구동기 측면에 내장 되어 있으며 모션제어기에서 PWM신호를 입력받아 모터에 전압을 공급하는 역할을 한다.



Fig. 2.10 3D model of the 2axis actuator

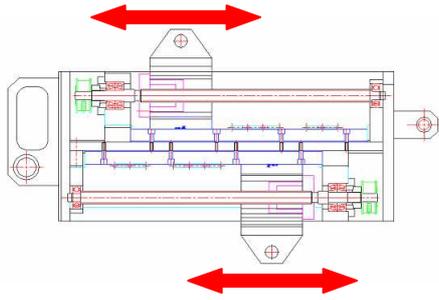


Fig.2.11 Structure of the 2axis actuator

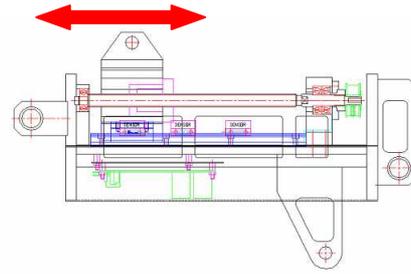


Fig.2.12 Structure of the 1axis actuator



Fig. 2.13 Front view of the ankle actuator



Fig. 2.14 Side view of the ankle actuator

제 3 장 이족보행로봇의 기구학 및 동역학 해석

로봇의 안정된 보행을 위해서는 로봇 하체의 관절에 대해 기구학(kinematics) 및 동역학(dynamics) 해석이 필요하다. 본 논문에서는 로봇의 보행을 주안점으로 하고 있으므로 로봇하체에 대하여 기구학적 해석을 하였고 허리의 중심부를 기준점으로 하여 왼쪽다리와 오른쪽다리를 각각 6축의 매니퓰레이터(manipulator)로 적용하였고 발바닥을 엔드 이펙터(end effector)로 두고 해석하였다. 또한 사절링크 구조의 관절이 보행시 움직일 때 동역학 방정식을 유도하여서, 실제 적용의 합리성을 보이고자 한다.

3.1 로봇 하체의 기구학 해석

로봇 하체의 기준점에 대하여 발끝의 좌표를 알아내기 위해서는 기구학에서 사용하는 동차변환(homogeneous transform)을 이용하면 간편하다. 로봇 하체에 각 관절의 각도가 주어졌을 때 말단장치의 위치와 방향을 결정하기 위한 이족보행로봇 하체의 순기구학 방정식은 Denavit - Hartenberg(D-H)규약에 의해 정의된 좌표계를 이용하여 유도한다. 이 규약은 각 동차변환 A_i 를 4개의 '기본' 변환행렬의 곱으로 표현하는 것이다.

$$R_{z,\theta} = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & 0 \\ \sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$R_{x,\theta} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta & -\sin\theta \\ 0 & \sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix}$$

$$R_{y,\theta} = \begin{bmatrix} \cos\theta & 0 & \sin\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\theta & 0 & \cos\theta \end{bmatrix}$$

$$A_i = Rot_{z,\theta_i} Trans_{z,d_i} Trans_{x,a_i} Rot_{x,\alpha_i}$$

여기서 θ_i , a_i , d_i , α_i 는 링크 i 와 관절 i 의 4개의 파라미터(parameter)이다. 이 파라미터들은 일반적으로 a_i 는 길이(length), α_i 는 비틀림(twist), d_i 는 오프셋(offset), θ_i 는 각도(angle)로 불린다. 행렬 A_i 는 단일변수의 함수이기 때문에 위의 4개의 파라미터 중 3개는 상수이고 1개만이 변수이다. 즉, 회전관절에서는 θ_i 가, 직선관절에서는 d_i 가 관절변수이다.

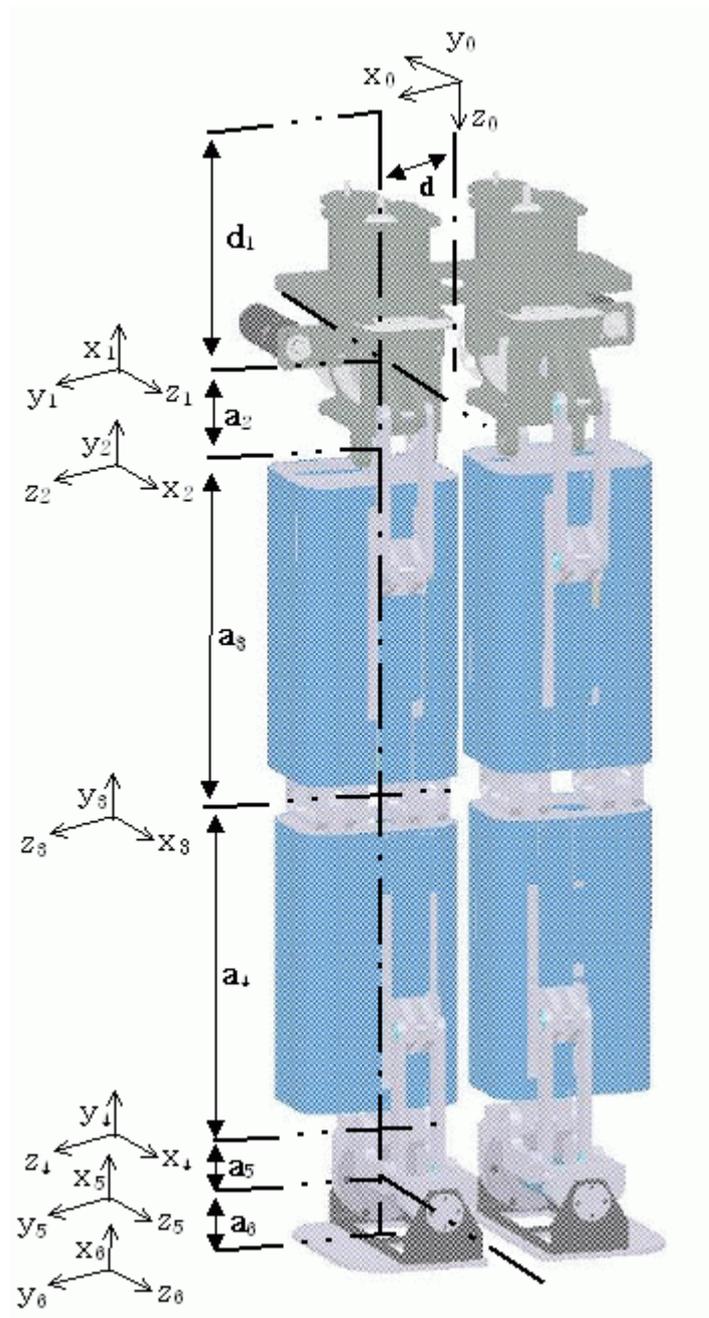


Fig. 3.1 D-H coordinate frame assignment for the lower body

Table 3.1 Link parameter for the lower body

link	a_i	α_i	d_i	θ_i
1	0	90°	d_1	θ_1^*
2	a_2	-90°	0	θ_2^*
3	a_3	0	0	θ_3^*
4	a_4	0	0	θ_4^*
5	a_5	90°	0	θ_5^*
6	a_6	0	0	θ_6^*

각 동차변환 A_i 는 다음과 같이 얻어진다.

$$A_1 = \begin{bmatrix} \cos \theta_1^* & 0 & \sin \theta_1^* & 0 \\ \sin \theta_1^* & 0 & -\cos \theta_1^* & 0 \\ 0 & 1 & 0 & d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A_2 = \begin{bmatrix} \cos \theta_2^* & 0 & -\sin \theta_1^* & a_2 \cos \theta_2^* \\ \sin \theta_2^* & 0 & \cos \theta_1^* & a_2 \sin \theta_2^* \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A_3 = \begin{bmatrix} \cos \theta_3^* & -\sin \theta_3^* & 0 & a_3 \cos \theta_3^* \\ \sin \theta_3^* & \cos \theta_3^* & 0 & a_3 \sin \theta_3^* \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A_4 = \begin{bmatrix} \cos \theta_4^* & -\sin \theta_4^* & 0 & a_4 \cos \theta_4^* \\ \sin \theta_4^* & \cos \theta_4^* & 0 & a_4 \sin \theta_4^* \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A_5 = \begin{bmatrix} \cos \theta_5^* & 0 & \sin \theta_5^* & a_5 \cos \theta_5^* \\ \sin \theta_5^* & 0 & -\cos \theta_5^* & a_5 \sin \theta_5^* \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A_6 = \begin{bmatrix} \cos \theta_6^* & -\sin \theta_6^* & 0 & a_6 \cos \theta_6^* \\ \sin \theta_6^* & \cos \theta_6^* & 0 & a_6 \sin \theta_6^* \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

여기서 골반부의 요축은 회전 보행시만 종속 동작하므로 $\theta_1 = 0$ 이라는 가정을

하면 변환 행렬 T_0^6 은 식()의 행렬들에 의해 다음과 같이 주어진다

$$T_0^6 = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & p_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & p_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$r_{11} = ((c\theta_2^*c\theta_3^*\theta_4^* - c\theta_2^*s\theta_3^*s\theta_4^*)c\theta_5^* + (-c\theta_2^*c\theta_3^*s\theta_4^* - c\theta_2^*s\theta_3^*c\theta_4^*)s\theta_5^*)c\theta_6^* - s\theta_2^*s\theta_6^*$$

$$r_{21} = ((s\theta_3^*c\theta_4^* + c\theta_3^*s\theta_4^*)c\theta_5^* + (-s\theta_3^*s\theta_4^* + c\theta_3^*c\theta_4^*)s\theta_5^*)c\theta_6^*$$

$$r_{31} = ((s\theta_2^*c\theta_3^*c\theta_4^* - s\theta_2^*s\theta_3^*s\theta_4^*)c\theta_5^* + (-s\theta_2^*c\theta_3^*s\theta_4^* - s\theta_2^*s\theta_3^*c\theta_4^*)s\theta_5^*)c\theta_6^* + c\theta_2^*s\theta_6^*$$

$$r_{12} = -((c\theta_2^*c\theta_3^*c\theta_4^* - c\theta_2^*s\theta_3^*s\theta_4^*)c\theta_5^* + (-c\theta_2^*c\theta_3^*s\theta_4^* - c\theta_2^*s\theta_3^*c\theta_4^*)s\theta_5^*)s\theta_6^* - s\theta_2^*c\theta_6^*$$

$$r_{22} = -((s\theta_3^*c\theta_4^* + c\theta_3^*s\theta_4^*)c\theta_5^* + (-s\theta_3^*s\theta_4^* + c\theta_3^*c\theta_4^*)s\theta_5^*)s\theta_6^*$$

$$r_{32} = -((s\theta_2^*c\theta_3^*c\theta_4^* - s\theta_2^*s\theta_3^*s\theta_4^*)c\theta_5^* + (-s\theta_2^*c\theta_3^*s\theta_4^* - s\theta_2^*s\theta_3^*c\theta_4^*)s\theta_5^*)s\theta_6^* + c\theta_2^*s\theta_6^*$$

$$r_{13} = (c\theta_2^*c\theta_3^*c\theta_4^* - c\theta_2^*s\theta_3^*s\theta_4^*)s\theta_5^* - (-c\theta_2^*c\theta_3^*s\theta_4^* - c\theta_2^*s\theta_3^*c\theta_4^*)c\theta_5^*$$

$$r_{23} = (s\theta_3^*c\theta_4^* + c\theta_3^*s\theta_4^*)s\theta_5^* - (-s\theta_3^*s\theta_4^* + c\theta_3^*c\theta_4^*)c\theta_5^*$$

$$r_{33} = (s\theta_2^*c\theta_3^*c\theta_4^* - s\theta_2^*s\theta_3^*s\theta_4^*)s\theta_5^* - (-s\theta_2^*c\theta_3^*s\theta_4^* - s\theta_2^*s\theta_3^*c\theta_4^*)c\theta_5^*$$

이때, 따라서, 말단장치의 위치 벡터 \mathbf{p} 는 다음과 같다.

$$p_x = ((c\theta_2^*c\theta_3^*c\theta_4^* - c\theta_2^*s\theta_3^*s\theta_4^*)c\theta_5^* + (-c\theta_2^*c\theta_3^*s\theta_4^* - c\theta_2^*s\theta_3^*c\theta_4^*)s\theta_5^*)c\theta_6^*a_6 - s\theta_2^*s\theta_6^*a_6 + (c\theta_2^*c\theta_3^*c\theta_4^* - c\theta_2^*s\theta_3^*s\theta_4^*)c\theta_5^*a_5 + (-c\theta_2^*c\theta_3^*s\theta_4^* - c\theta_2^*s\theta_3^*c\theta_4^*)s\theta_5^*a_5 + c\theta_2^*c\theta_3^*c\theta_4^*a_4 - c\theta_2^*s\theta_3^*c\theta_4^*a_4 + c\theta_2^*c\theta_3^*a_3 + c\theta_2^*a_2 + a_1$$

$$p_y = ((s\theta_3^*c\theta_4^* + c\theta_3^*s\theta_4^*)c\theta_5^* + (-s\theta_3^*s\theta_4^* + c\theta_3^*c\theta_4^*)s\theta_5^*)c\theta_6^*a_6 + (s\theta_3^*c\theta_4^* + c\theta_3^*s\theta_4^*)s\theta_5^*a_5 + (-s\theta_3^*s\theta_4^* + c\theta_3^*c\theta_4^*)s\theta_5^*a_5 + s\theta_3^*c\theta_4^*a_4 + c\theta_3^*s\theta_4^*a_4 + s\theta_3^*a_3$$

$$p_z = ((s\theta_2^*c\theta_3^*c\theta_4^* - s\theta_2^*s\theta_3^*s\theta_4^*)c\theta_5^* + (-s\theta_2^*c\theta_3^*s\theta_4^* - s\theta_2^*s\theta_3^*c\theta_4^*)s\theta_5^*)c\theta_6^*a_6 + c\theta_2^*s\theta_6^*a_6 + (s\theta_2^*c\theta_3^*c\theta_4^* - s\theta_2^*s\theta_3^*s\theta_4^*)c\theta_5^*a_5 + (-s\theta_2^*c\theta_3^*s\theta_4^* - s\theta_2^*s\theta_3^*c\theta_4^*)s\theta_5^*a_5 + s\theta_2^*c\theta_3^*c\theta_4^*a_4 - s\theta_2^*s\theta_3^*s\theta_4^*a_4 + s\theta_2^*c\theta_3^*a_3 + s\theta_2^*a_2 + d_1$$

3.2 자코비안

앞서 정의한 순기구학 방정식을 이용하여 속도관계를 구하려면 자코비안을 유도해야 되며, 관성 좌표계에 대한 말단 장치의 위치와 방향은 다음과 같이 주어진다.

$$T_0^n(q) = A_1(q_1), \dots, A_n(q_n) \quad (3.1)$$

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

여기서, $q = (q_1, \dots, q_7)^T$ 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 보행시 각각의 링크는 각기 다른 선속도와 각속도를 가진다. 따라서 말단장치의 선속도와 각속도를 기저 좌표계에 대한 관절속도의 벡터 $\dot{q}(t)$ 와 연관 지어야 한다.

X 및 Y 축에 대하여 각 링크의 위치를 d_0^n 로 표현한다면,

$$S(\omega_0^n) = \dot{R}_0^n (\dot{R}_0^n)^T \quad (3.2)$$

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

$$v_0^n = \dot{d}_0^n \quad (3.3)$$

위의 식이 말단장치의 선속도를 나타내며, 다음의 관계를 구할 수 있다.

$$v_{ci} = J_{v_i}(q)\dot{q}, \quad \omega_i = R_i^T(q)J_{\omega_i}(q)\dot{q}, \quad i=1, \dots, 7 \quad (3.4)$$

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

로봇의 관절은 전부 회전관절로 구성되어 있으므로 선속도 및 각속도를 포함하는 자코비안은 아래와 같이 정의된다.

$$J_i = \begin{bmatrix} z_i \times (O_n - O_i) \\ z_i \end{bmatrix}, i=1, \dots, 7 \quad (3.5)$$

여기서 $z_i \times (O_n - O_i)$ 부분이 선속도 자코비안이며, z_i 는 각속도 자코비안이다. 또한 앞서 지적했듯이 각속도는 각 링크에 부착된 좌표계로 나타낼 필요가 있다. Fig. 3.1 에서 보는 바와 같이 이족로봇의 각 관절은 회전관절로만 구성되어있고 각 관절 좌표계의 Z 축들이 같은 방향이므로 각속도 자코비안은 아래와 같이 동일하다.

$$J_{\omega i} = [0 \ 0 \ 1]^T, i=1, \dots, 7 \quad (3.6)$$

위에서 나타내어진 로봇에 대한 각 링크의 질량중심길이를 각각의 관절 각으로 편 미분하여 구해진 선속도 자코비안은 아래와 같이 정의된다.

행렬에서 각 행은 다음과 같다.

$$J_{v_c1} = \begin{bmatrix} -l_{c1}S_{q1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ l_{c1}C_{q1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$J_{v_c2} = \begin{bmatrix} -l_1S_{q1} - l_{c2}S_{q12} & -l_{c2}S_{q12} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ l_1C_{q1} + l_{c2}C_{q12} & l_{c2}C_{q12} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$J_{v_c3} = \begin{bmatrix} -l_1S_{q1} - l_2S_{q12} - l_{c3}S_{q123} & -l_2S_{q12} - l_{c3}S_{q123} & -l_{c3}S_{q123} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ l_1C_{q1} + l_2C_{q12} + l_{c3}C_{q123} & l_2C_{q12} + l_{c3}C_{q123} & l_{c3}C_{q123} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

J_{v_c4} 행렬에서 각 행은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} J_{v_c4}(1) &= [-l_1S_{q1} - l_2S_{q12} - l_4S_{q1234}, -l_2S_{q12} - l_4S_{q1234}, \\ &\quad -l_4S_{q1234}, -l_4S_{q1234} - l_{c5}S_{q1234}, 0, 0, 0] \\ J_{v_c4}(2) &= [l_1C_{q1} + l_2C_{q12} + l_4C_{q1234}, l_2C_{q12} + l_4C_{q1234}, \\ &\quad l_4C_{q1234}, l_4C_{q1234} + l_{c5}C_{q1234}, 0, 0, 0] \\ J_{v_c4}(3) &= [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0] \end{aligned}$$

J_{v_c5} 행렬에서 각 행은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} J_{v_c5}(1) &= [-l_1S_{q1} - l_2S_{q12} - l_4S_{q1234} - l_{c5}S_{q12345}, -l_2S_{q12} - l_4S_{q1234} - l_{c5}S_{q12345}, \\ &\quad -l_4S_{q1234} - l_{c5}S_{q12345}, -l_4S_{q1234} - l_{c5}S_{q1234}, -l_{c5}S_{q12345}, 0, 0] \\ J_{v_c5}(2) &= [l_1C_{q1} + l_2C_{q12} + l_4C_{q1234} + l_{c5}C_{q12345}, l_2C_{q12} + l_4C_{q1234} + l_{c5}C_{q12345}, \\ &\quad l_4C_{q1234} + l_{c5}C_{q12345}, l_4C_{q1234} + l_{c5}C_{q1234}, l_{c5}C_{q12345}, 0, 0] \\ J_{v_c5}(3) &= [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0] \end{aligned}$$

J_{v_c6} 행렬에서 각 행은 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
J_{v_6}(1) &= [-l_1 S_{q_1} - l_2 S_{q_{12}} - l_4 S_{q_{1234}} - l_5 S_{q_{12345}} - l_{c6} S_{q_{123456}}, -l_2 S_{q_{12}} - l_4 S_{q_{1234}} \\
&\quad - l_5 S_{q_{12345}} - l_{c6} S_{q_{123456}}, -l_4 S_{q_{1234}} - l_5 S_{q_{12345}} - l_{c6} S_{q_{123456}}, -l_4 S_{q_{1234}} \\
&\quad - l_5 S_{q_{1234}} - l_{c6} S_{q_{123456}}, -l_5 S_{q_{12345}} - l_{c6} S_{q_{123456}}, -l_{c6} S_{q_{123456}}, 0] \\
J_{v_6}(2) &= [l_1 C_{q_1} + l_2 C_{q_{12}} + l_4 C_{q_{1234}} + l_5 C_{q_{12345}} + l_{c6} C_{q_{123456}}, l_2 C_{q_{12}} + l_4 C_{q_{1234}} \\
&\quad + l_5 C_{q_{12345}} + l_{c6} C_{q_{123456}}, l_4 C_{q_{1234}} + l_5 C_{q_{12345}} + l_{c6} C_{q_{123456}}, l_4 C_{q_{1234}} \\
&\quad + l_5 C_{q_{1234}} + l_{c6} C_{q_{123456}}, l_5 C_{q_{12345}} + l_{c6} C_{q_{123456}}, + l_{c6} C_{q_{123456}}, 0] \\
J_{v_6}(3) &= [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]
\end{aligned}$$

J_{v_6} 행렬에서 각 행은 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
J_{v_7}(1) &= [-l_1 S_{q_1} - l_2 S_{q_{12}} - l_3 S_{q_{123}} - l_{c7} S_{q_{1237}}, -l_2 S_{q_{12}} - l_3 S_{q_{123}} - l_{c7} S_{q_{1237}}, \\
&\quad -l_3 S_{q_{1237}} - l_{c7} S_{q_{1237}}, 0, 0, -l_{c7} S_{q_{1237}}] \\
J_{v_7}(2) &= [l_1 C_{q_1} + l_2 C_{q_{12}} + l_3 C_{q_{123}} + l_{c7} C_{q_{1237}}, l_2 C_{q_{12}} + l_3 C_{q_{123}} + l_{c7} C_{q_{1237}}, \\
&\quad l_3 C_{q_{123}} + l_{c7} C_{q_{1237}}, 0, 0, 0, l_{c7} C_{q_{1237}}] \\
J_{v_7}(3) &= [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]
\end{aligned}$$

여기서, $C_{q_{1,\dots,7}} = \sum_{i=1}^7 \cos_i$, $S_{q_{1,\dots,7}} = \sum_{i=1}^7 \sin_i$, 을 의미한다.

3.3 이족보행로봇의 동역학 방정식 유도

이족보행로봇을 구성하는 다리는 Fig. 3.2 및 Fig. 3.3에 나타난 바와 같이 기본적으로 발목, 무릎 및 허리의 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.

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

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

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

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

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

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

$$M_{X_4} = l_1 \cos q_1 + l_2 \cos q_{12} + l_3 \cos q_{123} + l_{c4} \cos q_{1234}$$

$$M_{Y_4} = l_1 \sin q_1 + l_2 \sin q_{12} + l_3 \sin q_{123} + l_{c4} \sin q_{1234}$$

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

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

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

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

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

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

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. 또한 로봇의 설계는 상체 및 팔의 장착을 기본으로 설계 되었으므로 가상의 M_7 이 도시 되었다. 그리고 다리 부분은 지지부 및 스윙부로 구분될 수 있다.

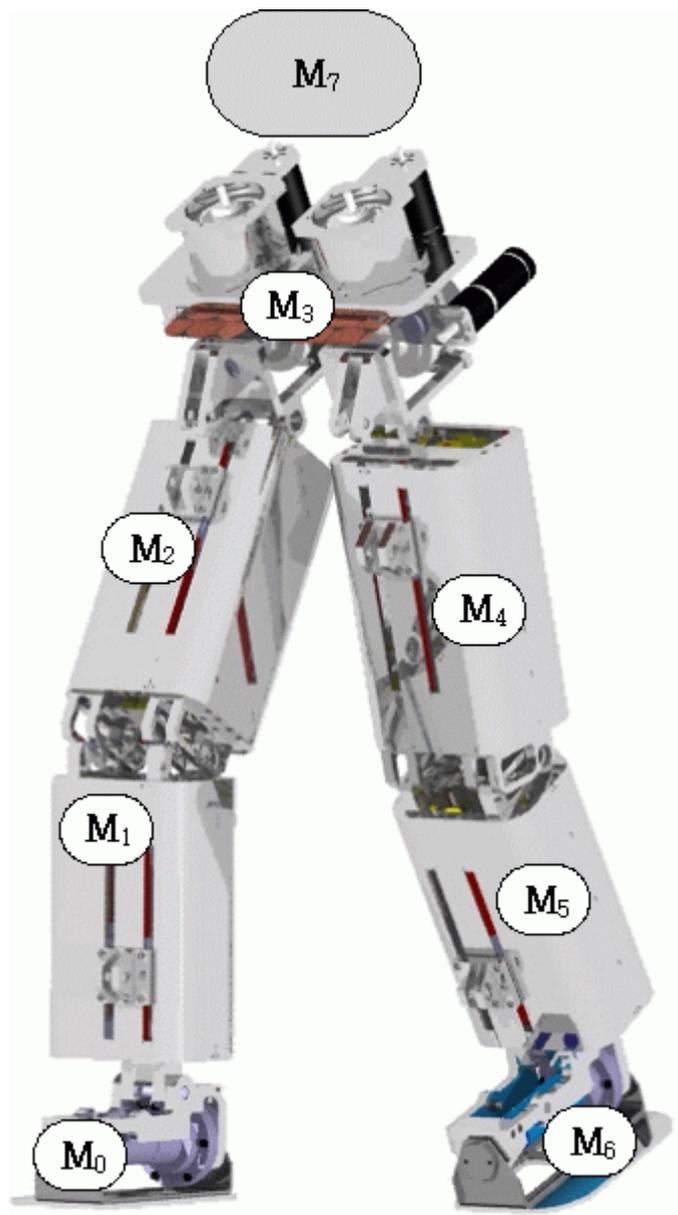


Fig. 3.2 Mass model of the KUBIR-2

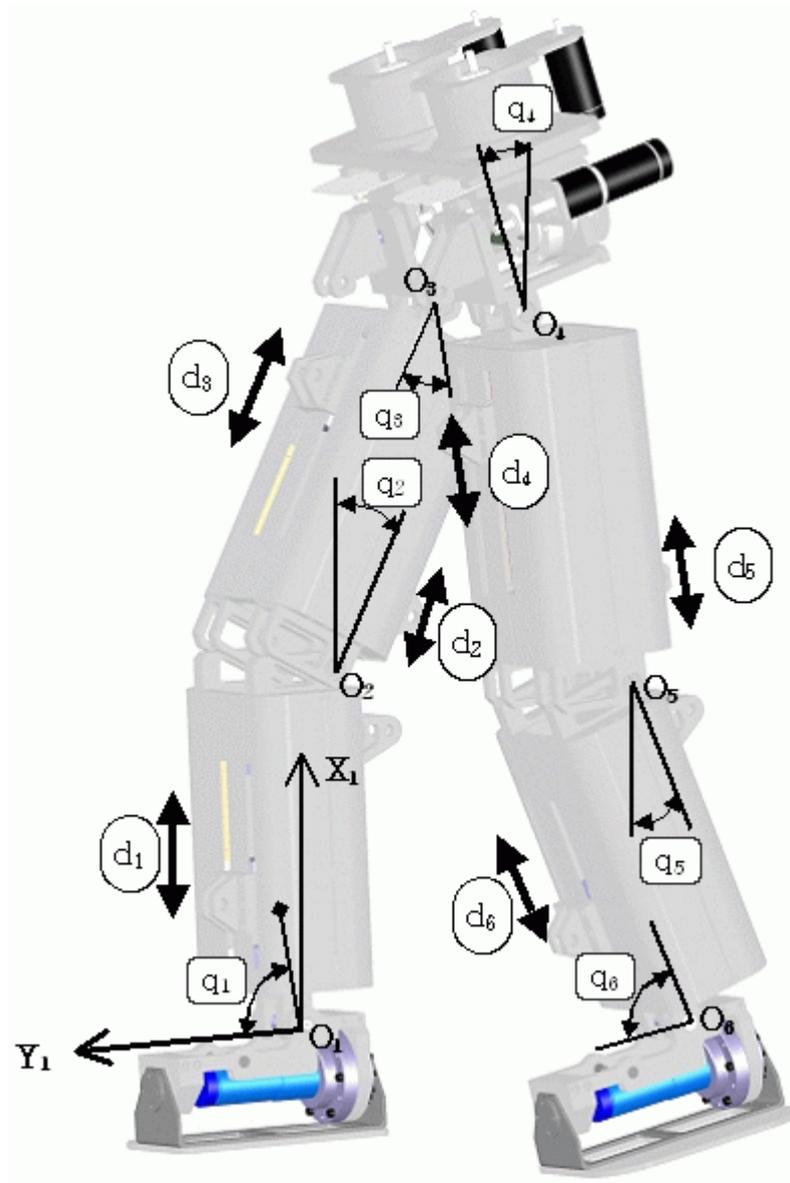


Fig. 3.3 Kinematics' model of the lower body

3.4 회전관절 공간의 로봇 동역학식

개발된 이족 보행 로봇에 대한 회전관절 공간의 동역학 방정식을 유도하기 위해서 Euler-Lagrange 방정식을 사용하였으며, 다음과 같이 정리될 수 있다.

$$\sum_j d_{kj}(q)\ddot{q}_j + \sum_{i,j} c_{ijk}(q)\dot{q}_i\dot{q}_j + \Phi_k(q) = \tau_k, \quad k=1,\dots,7 \quad (3.7)$$

여기서 q 는 관절각을 나타내며 $k=1,\dots,7$ 은 각 축을 나타낸다. 식 (3.7)의 첫 번째 항은 일반화 좌표의 2차 미분을 포함하는 양의 행렬인 관성행렬이고, 두 번째 항은 관절각 q 의 1차 미분의 곱으로 구성된 원심력 및 Coriolis 항으로 구성되었으며, 세 번째 항은 관절각 q 만 가지고 미분꼴을 가지지 않는 항으로 포텐셜에너지를 미분하여 얻어지는 항이다. 중력을 포함하는 항인 3번째 항은 토크입력 τ_i 가 없을 경우 외력으로 간주된다. 위의 7자유도에 관한 Euler-Lagrange 방정식에 대하여 관성행렬을 이용하여 행렬식으로 표현하면 다음과 같다.

$$D(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + \Phi(q) = \tau \quad (3.8)$$

여기서, $D(q) \in R^{7 \times 7}$, $C(q, \dot{q}) \in R^{7 \times 7}$, $\Phi(q) \in R^{7 \times 1}$ 이다.

이족보행로봇의 동역학 방정식을 유도하기 위해서는 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 축의 방향은 동일하다. 또한 ω_i 는 k 방향이므로 삼중곱 $\omega_i^T I \omega_i, i=1, \dots, 7$ 는 단순히 관성모멘트와 각속도 크기의 제곱임을 알 수 있다.

$\cos^2 \theta + \sin^2 \theta = 1, \cos \alpha \cos \beta + \sin \alpha \sin \beta = \cos(\alpha - \beta)$ 을 쓰면, 전체 시스템에 있어서 관성행렬을 구할 수 있다.

단, 여기서는 관성행렬의 일부분인 지지부의 발목에 있어서 발목을 기준 좌표로 상대적 관성행렬을 나타내었다.

$$\begin{aligned}
 D_{11} = & m_1 l_{c1}^2 + m_2 (l_1^2 + l_{c2}^2 + 2l_1 l_{c2} C_{q2}) + m_3 (l_1^2 + l_2^2 + l_{c3}^2 + 2l_1 l_2 C_{q2} + 2l_2 l_{c3} C_{q3} + 2l_1 l_{c3} C_{q23}) \\
 & + m_4 (l_1^2 + l_2^2 + l_{c4}^2 + 2l_1 l_2 C_{q2} + 2l_1 l_{c4} C_{q234} + 2l_2 l_{c4} C_{q34}) \\
 & + m_5 (l_1^2 + l_2^2 + l_4^2 + l_{c5}^2 + 2l_1 l_2 C_{q2} + 2l_1 l_4 C_{q234} + 2l_1 l_{c5} C_{q2345} + 2l_2 l_4 C_{q34} + 2l_2 l_{c5} C_{q345} \\
 & + 2l_4 l_{c5} C_{q5}) \\
 & + m_6 (l_1^2 + l_2^2 + l_4^2 + l_{c5}^2 + 2l_1 l_2 C_{q2} + 2l_1 l_4 C_{q234} + 2l_1 l_5 C_{q2345} + 2l_1 l_{c6} C_{q23456} \\
 & + 2l_2 l_4 C_{q345} + 2l_2 l_5 C_{q345} + 2l_2 l_{c6} C_{q3456} + 2l_4 l_5 C_{q5} + 2l_4 l_{c6} C_{q56} + 2l_5 l_{c6} C_{q6}) \\
 & + m_7 (l_1^2 + l_2^2 + l_4^2 + l_{c7}^2 + 2l_1 l_2 C_{q2} + 2l_1 l_3 C_{q23} + 2l_1 l_{c7} C_{q237} + 2l_1 l_{c7} C_{q237} + 2l_2 l_3 C_{q3} \\
 & + 2l_2 l_{c7} C_{q37} + 2l_3 l_{c7} C_{q7}) \\
 & + I_1 + I_2 + I_3 + I_4 + I_5 + I_6 + I_7
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
D_{12} &= m_2(l_{c_2}^2 + l_1 l_{c_2} C_{q_2}) + m_3(l_2^2 + l_{c_3}^2 + l_1 l_2 C_{q_2} + l_1 l_{c_3} C_{q_{23}} + 2l_2 l_{c_3} C_{q_3}) \\
&\quad + m_4(l_2^2 + l_{c_4}^2 + l_1 l_2 C_{q_2} + l_1 l_{c_4} C_{q_{234}} + 2l_2 l_{c_4} C_{q_{34}}) \\
&\quad + m_5(l_2^2 + l_4^2 + l_{c_5}^2 + l_1 l_2 C_{q_2} + l_1 l_4 C_{q_{234}} + l_1 l_{c_5} C_{q_{2345}} + 2l_2 l_4 C_{q_{34}} + 2l_2 l_{c_5} C_{q_{345}} \\
&\quad + 2l_4 l_{c_5} C_{q_5}) \\
&\quad + m_6(l_2^2 + l_4^2 + l_5^2 + l_{c_6}^2 + l_1 l_2 C_{q_2} + l_1 l_4 C_{q_{234}} + l_1 l_5 C_{q_{2345}} + l_1 l_{c_6} C_{q_{23456}} + 2l_2 l_4 C_{q_{345}} \\
&\quad + 2l_2 l_5 C_{q_{345}} + 2l_2 l_{c_6} C_{q_{3456}} + 2l_4 l_5 C_{q_5} + 2l_4 l_{c_6} C_{q_{56}} + 2l_5 l_{c_6} C_{q_6}) \\
&\quad + m_7(l_2^2 + l_3^2 + l_{c_7}^2 + l_1 l_2 C_{q_2} + l_1 l_3 C_{q_{23}} + l_1 l_{c_7} C_{q_{237}} + 2l_2 l_3 C_{q_3} + 2l_2 l_{c_7} C_{q_{37}} + 2l_3 l_{c_7} C_{q_7}) \\
&\quad + I_2 + I_3 + I_4 + I_5 + I_6 + I_7 \\
&= D_{21}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
D_{13} &= m_3(l_{c_3}^2 + l_1 l_{c_3} C_{q_{23}} + l_2 l_{c_3} C_{q_3}) + m_4(l_{c_4}^2 + l_1 l_{c_4} C_{q_{234}} + l_2 l_{c_4} C_{q_{34}}) \\
&\quad + m_5(l_4^2 + l_{c_5}^2 + l_1 l_4 C_{q_{234}} + l_1 l_{c_5} C_{q_{2345}} + 2l_2 l_4 C_{q_{34}} + 2l_2 l_{c_5} C_{q_{345}} + 2l_4 l_{c_5} C_{q_5}) \\
&\quad + m_6(l_4^2 + l_5^2 + l_{c_6}^2 + l_1 l_4 C_{q_{234}} + l_1 l_5 C_{q_{2345}} + l_1 l_{c_6} C_{q_{23456}} + 2l_2 l_4 C_{q_{345}} \\
&\quad + 2l_2 l_5 C_{q_{345}} + 2l_2 l_{c_6} C_{q_{3456}} + 2l_4 l_5 C_{q_5} + 2l_4 l_{c_6} C_{q_{56}} + 2l_5 l_{c_6} C_{q_6}) \\
&\quad + m_7(l_3^2 + l_{c_7}^2 + l_1 l_2 C_{q_2} + l_1 l_3 C_{q_{23}} + l_1 l_{c_7} C_{q_{237}} + l_2 l_3 C_{q_3} + l_2 l_{c_7} C_{q_{37}} + 2l_3 l_{c_7} C_{q_7}) \\
&\quad + I_3 + I_4 + I_5 + I_6 + I_7 \\
&= D_{31}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
D_{14} &= m_4(l_{c_4}^2 + l_1 l_{c_4} C_{q_{234}} + l_2 l_{c_4} C_{q_{34}}) \\
&\quad + m_5(l_4^2 + l_{c_5}^2 + l_1 l_4 C_{q_{234}} + l_1 l_{c_5} C_{q_{2345}} + 2l_2 l_4 C_{q_{34}} + 2l_2 l_{c_5} C_{q_{345}} + 2l_4 l_{c_5} C_{q_5}) \\
&\quad + m_6(l_4^2 + l_5^2 + l_{c_6}^2 + l_1 l_4 C_{q_{234}} + l_1 l_5 C_{q_{2345}} + l_1 l_{c_6} C_{q_{23456}} + 2l_2 l_4 C_{q_{345}} \\
&\quad + 2l_2 l_5 C_{q_{345}} + 2l_2 l_{c_6} C_{q_{3456}} + 2l_4 l_5 C_{q_5} + 2l_4 l_{c_6} C_{q_{56}} + 2l_5 l_{c_6} C_{q_6}) \\
&\quad + I_4 + I_5 + I_6 \\
&= D_{41}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
D_{15} &= m_5(l_{c_5}^2 + l_{c_5} C_{q_{2345}} + l_2 l_{c_5} C_{q_{345}} + l_4 l_{c_5} C_{q_5}) \\
&\quad + m_6(l_5^2 + l_{c_6}^2 + l_1 l_5 C_{q_{2345}} + l_1 l_{c_6} C_{q_{23456}} + l_2 l_5 C_{q_{345}} + l_2 l_{c_6} C_{q_{3456}} + l_4 l_5 C_{q_5} \\
&\quad + l_4 l_{c_6} C_{q_{56}} + 2l_5 l_{c_6} C_{q_6}) \\
&\quad + I_5 + I_6 \\
&= D_{51}
\end{aligned}$$

$$D_{16} = m_6(l_{c6}^2 + l_1 l_{c5} C_{q23456} + l_2 l_{c6} C_{q3456} + l_4 l_{c6} C_{q56} + 2l_5 l_{c6} C_{q6}) + I_6 = D_{61}$$

$$D_{17} = m_7(l_{c7}^2 + l_1 l_{c7} C_{q237} + l_2 l_{c7} C_{q37} + l_3 l_{c7} C_{q7}) + I_7 = D_{71} \text{ 이며, 각 파라미터 들은}$$

다음과 같이 정의 된다.

l_1 : 발목에서 무릎까지의 링크 길이

l_{c1} : 발목 좌표계(O_1)에서 l_1 상의 무게중심까지의 길이

l_2 : 무릎에서 대퇴부까지의 링크길이

l_{c2} : 무릎 좌표계(O_2)에서 l_2 상의 무게중심까지의 길이

l_3 : 대퇴부에서 상부 균형 관절까지의 링크 길이

l_{c3} : 대퇴부 좌표계(O_3)에서 l_3 의 무게중심까지의 거리

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

l_4 : 대퇴부에서 무릎까지의 링크 길이

l_{c4} : 대퇴부 좌표계(O_4)에서 l_4 상의 무게중심까지의 길이

l_5 : 무릎에서 발목까지의 링크 길이

l_{c5} : 무릎 좌표계(O_5)에서 l_5 상의 무게중심까지의 길이

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 펜듈럼 좌표계(O_7)에서 상단방향의 무게중심 거리

Christoffel항은 곱의 꼴 \dot{q}^i 을 가지는 원심력 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 발생하는 간섭력 항을 포함한다. 여기서는 지지부의 발목에 있어서 부분적인 Christoffel항을 나타내었다.

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

$$\begin{aligned} C_{121} &= -m_2 l_1 l_{c2} S_{q_2} - m_3 (l_1 l_2 S_{q_2} + l_1 l_{c3} S_{q_{23}}) - m_4 (l_1 l_2 S_{q_2} + l_1 l_{c4} S_{q_{234}}) \\ &\quad - m_5 (l_1 l_2 S_{q_2} + l_1 l_4 S_{q_{234}} + l_1 l_{c5} S_{q_{2345}}) \\ &\quad - m_6 (l_1 l_2 S_{q_2} + l_1 l_4 S_{q_{234}} + l_1 l_5 S_{q_{2345}} + l_1 l_{c6} S_{q_{23456}}) \\ &\quad - m_7 (l_1 l_2 S_{q_2} + l_1 l_3 S_{q_{23}} + l_1 l_{c7} S_{q_{237}}) \\ &= C_{211} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} C_{131} &= -m_3 (l_1 l_{c3} S_{q_{23}} + l_2 l_{c3} S_{q_3}) - m_4 (l_1 l_{c4} S_{q_{234}} + l_2 l_{c4} S_{q_{34}}) \\ &\quad - m_5 (l_1 l_4 S_{q_{234}} + l_1 l_{c5} S_{q_{2345}} + l_2 l_4 S_{q_{34}} + l_2 l_{c5} S_{q_{345}}) \\ &\quad - m_6 (l_1 l_4 S_{q_{234}} + l_1 l_5 S_{q_{2345}} + l_1 l_{c6} S_{q_{23456}} + l_2 l_4 S_{q_{34}} + l_2 l_5 S_{q_{345}} + l_2 l_{c6} S_{q_{3456}}) \\ &\quad - m_7 (l_1 l_3 S_{q_{23}} + l_1 l_{c7} S_{q_{237}} + l_2 l_3 S_{q_3} + l_2 l_{c7} S_{q_{37}}) \\ &= C_{311} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} C_{141} &= -m_4 (l_1 l_{c4} S_{q_{234}} + l_2 l_{c4} S_{q_{34}}) \\ &\quad - m_5 (l_1 l_4 S_{q_{234}} + l_1 l_{c5} S_{q_{2345}} + l_2 l_4 S_{q_{34}} + l_2 l_{c5} S_{q_{345}}) \\ &\quad - m_6 (l_1 l_4 S_{q_{234}} + l_1 l_5 S_{q_{2345}} + l_1 l_{c6} S_{q_{23456}} + l_2 l_4 S_{q_{34}} + l_2 l_5 S_{q_{345}} + l_2 l_{c6} S_{q_{3456}}) \\ &= C_{411} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
C_{151} &= -m_5(l_1 l_{c5} S_{q_{2345}} + l_2 l_{c5} S_{q_{345}} + l_4 l_{c5} S_{q_5}) \\
&\quad - m_6(l_1 l_5 S_{q_{2345}} + l_1 l_{c6} S_{q_{23456}} + l_2 l_5 S_{q_{345}} + l_2 l_{c6} S_{q_{3456}} + l_4 l_5 S_{q_5} + l_4 l_{c6} S_{q_{56}}) \\
&= C_{511}
\end{aligned}$$

$$C_{161} = -m_6(l_1 l_{c6} S_{q_{23456}} + l_2 l_{c6} S_{q_{3456}} + l_4 l_{c6} S_{q_{56}} + l_5 l_{c6} S_{q_6}) = C_{611}$$

$$C_{171} = -m_7(l_1 l_{c7} S_{q_{237}} + l_2 l_{c7} S_{q_{37}} + l_3 l_{c7} S_{q_7}) = C_{711}$$

전방 보행형태를 7개의 링크로 연결된 매니플레이터로 가정한다면 매니플레이터의 포텐셜에너지는 단순히 7개의 링크 포텐셜에너지의 합이다. 각 링크에 대해서 포텐셜에너지는 질량곱하기 중력가속도 곱하기 질량중심의 높이이다. 다시 말하면 물체의 총 포텐셜에너지는 대상물의 전체 질량이 질량중심에 모였을 때와 같다. 구해진 총 포텐셜에너지를 각 링크의 관절변수에 대하여 편미분하면 Euler-Lagrange 방정식에 포함되는 포텐셜에너지 항을 구할 수 있다. 구한 매니플레이터의 포텐셜에너지는 벡터 q 에 좌우되고 \dot{q} 에 좌우되지 않는다. 구한 각 링크의 포텐셜에너지는 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
\Phi_1 &= (m_1 g l_{c1} + m_2 g l_1 + m_3 g l_1 + m_5 g l_1 + m_6 g l_1 + m_7 g l_1) C_{q_1} \\
&\quad + (m_2 g l_{c2} + m_3 g l_2 + m_5 g l_2 + m_4 g l_2 + m_6 g l_2 + m_7 g l_2) C_{q_{12}} \\
&\quad + (m_3 g l_{c3} + m_7 g l_{c7}) C_{q_{123}} + (m_4 g l_{c4} + m_5 g l_4 + m_6 g l_5 + m_6 g l_6) C_{q_{1234}} \\
&\quad + (m_5 g l_{c5} + m_6 g l_5) C_{q_{12345}} + m_6 g l_{c6} C_{q_{123456}} + m_7 g l_{c7} C_{q_{1237}}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\Phi_2 &= (m_2 g l_{c2} + m_3 g l_2 + m_5 g l_2 + m_4 g l_2 + m_6 g l_2 + m_7 g l_2) C_{q_{12}} \\
&\quad + (m_3 g l_{c3} + m_7 g l_{c7}) C_{q_{123}} + (m_4 g l_{c4} + m_5 g l_4 + m_6 g l_5 + m_6 g l_6) C_{q_{1234}} \\
&\quad + (m_5 g l_{c5} + m_6 g l_5) C_{q_{12345}} + m_6 g l_{c6} C_{q_{123456}} + m_7 g l_{c7} C_{q_{1237}}
\end{aligned}$$

$$\Phi_3 = (m_3 g l_{c3} + m_7 g l_{c7}) C_{q123} + (m_4 g l_{c4} + m_5 g l_4 + m_6 g l_5 + m_6 g l_6) C_{q1234} \\ + (m_5 g l_{c5} + m_6 g l_5) C_{q12345} + m_6 g l_{c6} C_{q123456} + m_7 g l_{c7} C_{q1237}$$

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

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

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

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

3.5 회전관절과 직선관절의 관계식

본 논문에서 개발된 로봇은 관절 운동을 위해서 사절 링크의 구동기인 볼나사 구동에 의해 이루어진다. 기존의 보행로봇들은 구동모터가 관절에 직결되어 있어서 로봇 동역학식이 관절공간에서 표현되었으나 개발된 로봇은 4절 링크 구동기는 볼나사에 엔코더가 부착된 서보모터가 직결되어 구동하므로 직선 운동 공간에서 로봇의 동역학식이 표현되는 것이 바람직하다. 이를 위해 사절 링크로 관계되는 로봇의 관절운동과 직선 운동 간의 관계를 다음과 같이 해석하였다.

3.5.1 골반 회전관절과 직선관절 간의 관계식

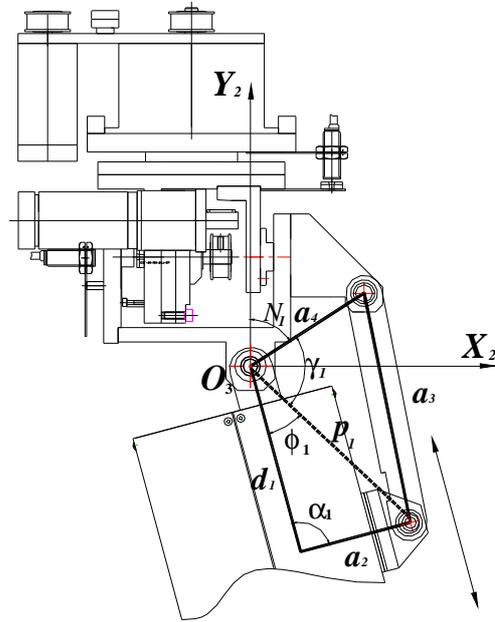


Fig. 3.4 Four-bar-link structure for thigh joint

골반관절의 회전각과 볼나사의 직선운동의 관계는 Fig. 3.4과 같이 표현될 수 있으며, 관절각 q_1 과의 관계는 $q_1 = 180^\circ - \phi_1 - \gamma_1 - N_1$ 로 나타낼 수 있다. 여기서 N 은 고정각이다. 볼나사 구동의 직선운동 변위는 d_1 이고 발목관절의 각을 결정하는 q_1 와 d_1 은 코사인 법칙을 사용하면 다음과 같이 관계는 다음과 같다.

$$p_1^2 + a_4^2 - 2p_1a_4 \cos \gamma_1 = a_3^2 \quad (3.9)$$

$$p_1 \cos \phi_1 = d_1 \quad (3.10)$$

$$\dot{p}_1 \cos \phi_1 - p_1 \sin \phi_1 \dot{\phi}_1 = \dot{d}_1 \quad (3.11)$$

관절각 q_1 의 각속도 \dot{q}_1 과 관절의 회전을 결정하는 ϕ_1, γ_1 의 속도 관계는 다음과 같다.

$$\dot{q}_1 = \dot{\phi}_1 + \dot{\gamma}_1 \quad (3.12)$$

위 식을 식(3.9)(3.10)(3.11)을 이용하여 1차 및 2차 미분을 하면 다음과 같이 q_1 과 d_1 의 속도 및 가속도의 관계를 정리 할 수 있다.

$$\dot{q}_1 = \dot{\phi}_1 + \dot{\gamma}_1 = R_{11} \dot{d}_1 \quad (3.13)$$

$$\ddot{q}_1 = \ddot{\phi}_1 + \ddot{\gamma}_1 = R_{12} \dot{d}_1^2 + R_{13} \ddot{d}_1 \quad (3.14)$$

여기서

$$R_{11} = (a_4 \cos \gamma_1 - 1) / p_1 a_4 \sin r_2 + (p_1 d_1 \cos \phi_1 - 1) / p_1 \sin \phi_1$$

$$R_{12} = -2 - 4(a_4 \cos \gamma_1 - 1) / a_4 - 2(a_4 \cos r_1) / (p_1 a_4 \sin^2 \gamma_1)$$

$$+ ((p_1 d_1^2 + p_1) \cos \phi_1 - 2(p_1 d_1 \cos \phi_1 - 1) d_1$$

$$- (p_1 d_1^2 \cos \phi_1 - 1)^2 \cos \phi_1 p_1 \sin^2 \phi_1) / p_1 \sin \phi_1$$

$$R_{13} = a_4 \cos \gamma_1 - p_1 + (p_1 d_1 \cos \phi_1 - 1) / p_1 \sin \phi_1 \quad \text{이다.}$$

3.5.2 무릎 회전관절과 직선관절 간의 관계식

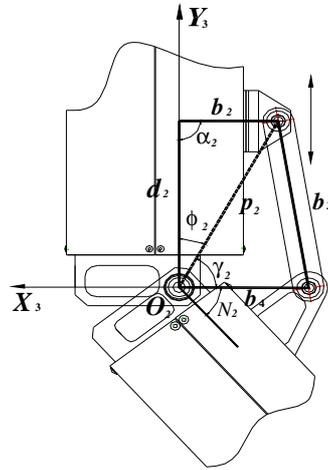


Fig. 3.5 Four-bar-link structure for knee joint

Fig. 3.5에서 볼 수 있듯이 무릎관절은 골반관절과 비슷한 구조로 해석 할 수 있다. 관절각 q_2 와 관계는 $q_2 = 180^\circ - \phi_2 + \gamma_2 - N_2$ 로 나타낼 수 있다. 여기서 N_2 은 고정각이다. 여기서, 볼나사 구동의 직선운동 변위는 d_2 이고 관절의 각을 결정하는 q_2 와 d_2 의 관계는 다음과 같다.

$$p_2^2 + b_4^2 - 2p_2b_4 \cos \gamma_2 = b_3^2 \quad (3.15)$$

$$p_2 \cos \phi_2 = d_2 \quad (3.16)$$

$$\dot{p}_2 \cos \phi_2 - p_2 \sin \phi_2 \dot{\phi}_2 = \dot{d}_2 \quad (3.17)$$

위의 관계식을 이용하여 식(3.15)(3.16)(3.17)를 1차 및 2차 미분하면 회전 관절각과 직선관절의 관계식을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\dot{q}_2 = \dot{\phi}_2 + \dot{\gamma}_2 = R_{21} \dot{d}_2 \quad (3.18)$$

$$\ddot{q}_2 = \ddot{\phi}_2 + \ddot{\gamma}_2 = R_{22} \dot{d}_2^2 + R_{23} \ddot{d}_2 \quad (3.19)$$

여기서 R_{21}, R_{22}, R_{23} 은 다음과 같다.

$$R_{21} = (b_4 \cos \gamma_2 - 1) / p_2 b_4 \sin r_2 + (p_2 d_2 \cos \phi_2 - 1) / p_2 \sin \phi_2$$

$$R_{22} = -2 - 4(b_4 \cos \gamma_2 - 1) / b_4 - 2(b_4 \cos r_2) / (p_2 b_4 \sin^2 \gamma_2)$$

$$+ ((p_2 d_2^2 + p_2) \cos \phi_2 - 2(p_2 d_2 \cos \phi_2 - 1) d_2$$

$$- (p_2 d_2^2 \cos \phi_2 - 1)^2 \cos \phi_2 p_2 \sin^2 \phi_2) / p_2 \sin \phi_2$$

$$R_{23} = b_4 \cos \gamma_2 - p_2 + (p_2 d_2 \cos \phi_2 - 1) / p_2 \sin \phi_2$$

3.5.3 발목 회전관절과 직선관절 간의 관계식

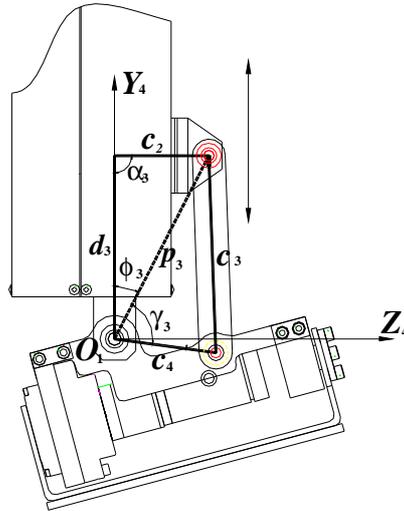


Fig. 3.6 For-bar-link structure for ankle joint

Fig. 3.6은 발목관절의 링크형태를 도시한 그림이다. 발목관절 역시 골반관절과 유사한 형태로 구동되고 있으나, 발목관절의 발목 회전각 q_3 은 $q_3 = \phi_3 + \gamma_3$ 이며 다른 관절에서 볼 수 있었던 고정각 N 이 없음을 알 수 있다. 발목관절 역시 볼나사 구동의 직선운동 변위는 d_3 이고 발목관절의 각을 결정하는 q_3 와 d_3 의 관계는 다음과 같다.

$$p_3^2 + c_4^2 - 2p_3c_4 \cos \gamma_3 = c_3^2 \quad (3.20)$$

$$p_3 \cos \phi_3 = d_3 \quad (3.21)$$

$$\dot{p}_3 \cos \phi_3 - p_3 \sin \phi_3 \dot{\phi}_3 = \dot{d}_3 \quad (3.22)$$

위 관계식을 이용하여 식(3.20)(3.21)(3.22)를 1차 및 2차 미분하면 회전관절각과 직선관절의 관계식을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\dot{q}_3 = \dot{\phi}_3 + \dot{\gamma}_3 = R_{31} \dot{d}_3 \quad (3.23)$$

$$\ddot{q}_3 = \ddot{\phi}_3 + \ddot{\gamma}_3 = R_{32} \dot{d}_3^2 + R_{33} \ddot{d}_3 \quad (3.24)$$

여기서 R_{31}, R_{32}, R_{33} 은 다음과 같이 정리 되었다.

$$R_{31} = (c_4 \cos \gamma_3 - 1) / p_3 c_4 \sin \gamma_3 + (p_3 d_3 \cos \phi_3 - 1) / p_3 \sin \phi_3$$

$$R_{32} = -2 - 4(c_4 \cos \gamma_3 - 1) / c_4 - 2(c_4 \cos \gamma_3) / (p_3 c_4 \sin^2 \gamma_3)$$

$$+ ((p_3 d_3^2 + p_3) \cos \phi_3 - 2(p_3 d_3 \cos \phi_3 - 1) d_3$$

$$- (p_3 d_3^2 \cos \phi_3 - 1)^2 \cos \phi_3 p_3 \sin^2 \phi_3) / p_3 \sin \phi_3$$

$$R_{33} = c_4 \cos \gamma_3 - p_3 + (p_3 d_3 \cos \phi_3 - 1) / p_3 \sin \phi_3$$

각 관절들의 회전각과 사절링크의 직선운동 변위 사이의 위치, 속도 및 가속도 관계식을 구하였다. 따라서 회전관절 공간으로 표현된 로봇의 동역학식을 직선운동 관절공간의 동역학 식으로 표현할 수 있게 되었다.

3.5.4 직선운동 관절 공간에서의 제어입력

회전관절 공간이 로봇 동역학식이 직선관절 공간에서 표현됨에 따라 회전관절 공간의 토크 τ 도 직선운동 방향의 구동력 F 로 표현되어야 한다. 이의 관계식을 유도하기 위하여 관절 공간상의 점 O_1, O_2, O_3 에서 각각의 볼 나사의 직선 운동 방향에 접선을 그렸을 때, 이 접선의 길이와 볼 나사에 가해지는 구동력 F_i 의 곱이 각 관절에서 발생하는 토크가 되며 이의 관계식은 다음과 같다.

$$\tau_i = F_i \cdot p_i \sin \phi_i \quad (3.25)$$

여기서 ϕ_i, p_i 을 정리하면 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\phi_i = a \cos(d_i / p_i) \quad (3.26)$$

$$p_i = \sqrt{d_i^2 + a^2}$$

여기서 $i=1,2,3$ 은 골반, 무릎, 발목 관절로 이어지는 순서이며 a 는 관절에 따라 b, c 로 대체 될 수 있다.

3.5.5 적선관절 공간의 동역학 식

본 논문에서 제작한 이족보행로봇은 사절 링크구조에서 회전링크의 한 변을 볼 나사를 사용하여 직선운동으로 대체함으로써 볼나사의 길이변화에 의한 서로 연결된 다른 링크의 회전각을 변환시키고 궁극적으로 로봇 다리의 회전축을 구동한다. 유도된 발목, 무릎 및 대퇴부의 회전관절 각의 변위 q_i 와 볼나사 길이 방향의 미끄럼 변위 d_i 의 관계식을 회전관절구조에서의 Euler-Lagrange 방정식에 대입함에 따라서 관절각 변위 $[q_1, \dots, q_7]$ 가 $[d_1, \dots, d_6, q_7]$ 인 미끄럼 변위로 대체되었다. 또한 제어입력에 대하여 식 (3.25)처럼 관절구동을 위한 토크 입력을 볼나사 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(3.7)을 다음의 미끄럼 관절공간의 식으로 표현하였다. 단, 여기서 균형관절인 q_7 의 경우 회전관절이므로 회전관절 변위 및 토크 제어입력을 그대로 사용한다.

$$H(d)\ddot{d} + Q(d, \dot{d})\dot{d} + h_f(d) = LF \quad (3.27)$$

여기서, $i, j = 1, \dots, 6$ 일 때

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

로 표현된다. 식(3.18)에서 L은 각관절의 2번째 링크의 길이(a_2, b_2, c_2)를 의미 한다.

3.6 시뮬레이션

본 시뮬레이션에는 c언어를 이용하여 앞서 유도 한 동역학 방정식을 4차 Runge-kutta 방법으로 시뮬레이션 하였다. 시뮬레이션은 Fig. 3.7과 같이 양 발로 선 자세에서 앉는 자세로의 동작변화에 따른 피치운동의 시뮬레이션이며 외력은 가하지 않고 중력항만 고려하였다. 먼저 시뮬레이션 하기 위하여 우선 적으로 부드러운 궤적을 설정 하였다. 궤적은 t 에 대한 3차 궤적식으로 표현 하였으며, 운동의 시작과 끝의 속도가 0이 되도록 설정하였다. 3차 다항식의 표현은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} q_i(t) &= q_0 + 3(q_1 - q_0)t^2 - 2(q_1 - q_0)t^3 \\ \dot{q}_i(t) &= 6(q_1 - q_0)t - 6(q_1 - q_0)t^2 \\ \ddot{q}_i(t) &= 6(q_1 - q_0) - 12(q_1 - q_0)t \end{aligned} \quad (3.28)$$

여기서 초기시간 $t_0=0$, 최종시간을 $t_f=1$ 초로 설정하였으며, 관절각 q_i 의 초기속도 및 최종속도 역시 다음과 같이 가정하였다.

$$\dot{q}_0 = 0 \quad \dot{q}_1 = 0$$

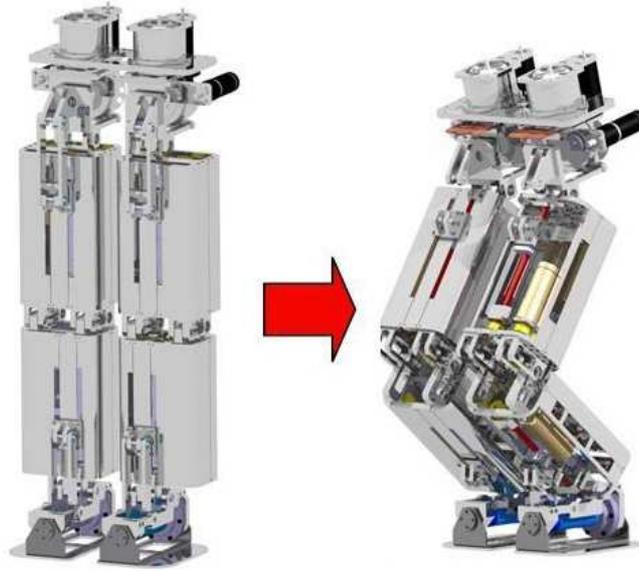


Fig. 3.7 Motional variation of the robot

시뮬레이션은 볼나사의 이동거리, 즉 엔코더 값을 바탕으로 입력 d_i 에 따라서 구동되며 시뮬레이션에 필요한 변수들을 관절의 회전각 q_i 와 d_i 에 대한 식으로 간단히 표현하면 다음과 같이 정리 할 수 있다.

$$q_i = 180^\circ - N_i - \phi_i - \gamma_i \quad (3.29)$$

여기서 N_i 는 각 관절의 고정각이며,

$$\phi_i = \tan^{-1}(a_2 / d_i) \quad (3.30)$$

$$\gamma_i = \cos^{-1}\left(\frac{-a_2^2 + a_4 + d_i^2 + a_4^2}{2a_4(a_2 / \sin \phi_i)}\right) \quad (3.31)$$

위 식에서 a 는 관절에 따라 b, c ,로 대체 될 수 있으며 $i=1,2,3$ 관절변수

이다. 그리고 시뮬레이션에서 사용된 사절링크 구동기의 상수 값은 Table 3.2, 3.3, 및 3.4 와 같으며 로봇의 전체 물성치는 Table 3.5와 같다. 각 관절에서 d_i 는 볼나사의 이동거리이며 시뮬레이션은 $0 \leq t \leq 1$ 동안 0.005초씩 증분하여 구동하였다.

Table 3.2 Material properties for the thigh joint

Constants Actuator	b_2 (mm)	a_3 (mm)	a_4 (mm)	d_1 (mm)	N_1 (deg)
Thigh	79.5	164	94	113~226	57

Table 3.3 Material properties for the knee joint

Constants Actuator	b_2 (mm)	b_3 (mm)	b_4 (mm)	d_2 (mm)	N_2 (deg)
Knee	80	156.5	104.5	95~115	49

Table 3.4 Material properties for the ankle joint

Constants Actuator	c_2 (mm)	c_3 (mm)	c_4 (mm)	d_3 (mm)	N_3 (deg)
Ankle	71.5	150	77.5	75.8~107	0

Table 3.5 Material properties for the KUBIR-2

Constants	Length(<i>mm</i>)	Weight(<i>kg</i>)	Inertia(<i>kg – mm²</i>)
Shank	341	6	15220
Shank C.O.M	170.5	6	15220
Thigh	367	7	15432
Thigh C.O.M	183.5	7	15432
Hip	233	14	14687
Hip C.O.M	77.5	14	14687
Foot	113	4	4657
Pendulum	220	20	22004

볼나사의 이동거리에서 생성되는 로봇의 동작은 3D 모션 시뮬레이터에서 결정되었으며, 시뮬레이션에서 도출된 볼나사의 이경경로에 따른 속도 및 가속도와 그에 따른 제어입력은 Fig. 3.8, 3.9, 3.10, 및 3.11 과 같으며 Fig. 3.11, 3.12, 3.13은 볼나사의 이동에 따른 관절각 q_1 의 경로 및 속도 가속도의 결과이다. 여기서 보행로봇의 각 관절들의 결과는 골반, 무릎 및 발목 관절 순으로 정리되었다.

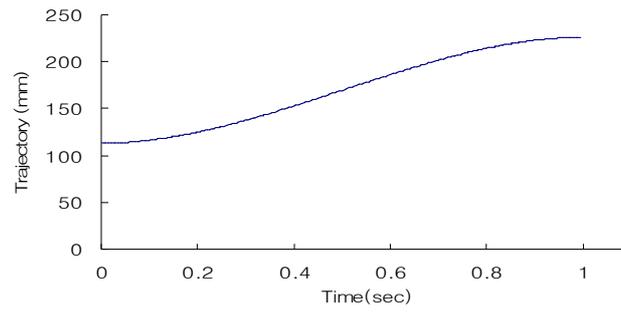


Fig. 3.8(a) Trajectory of the ballscrew in thigh joint

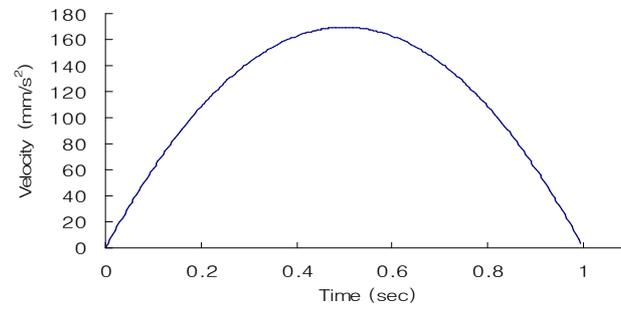


Fig. 3.8(b) Velocity of the ballscrew in thigh joint

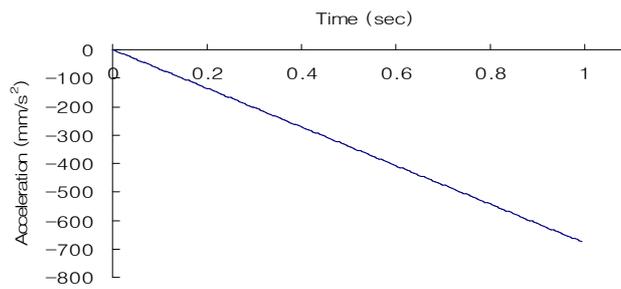


Fig. 3.8(c) Acceleration of the ballscrew in thigh joint

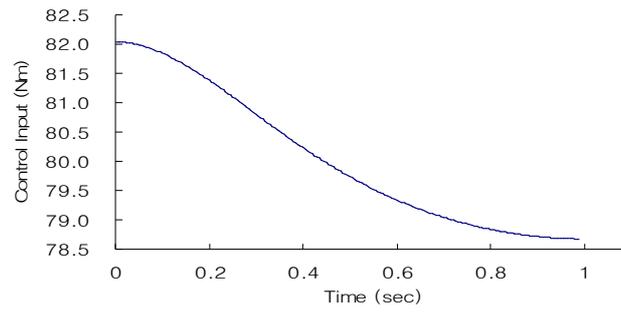


Fig. 3.8(d) Control input of the ballscrew in thigh joint

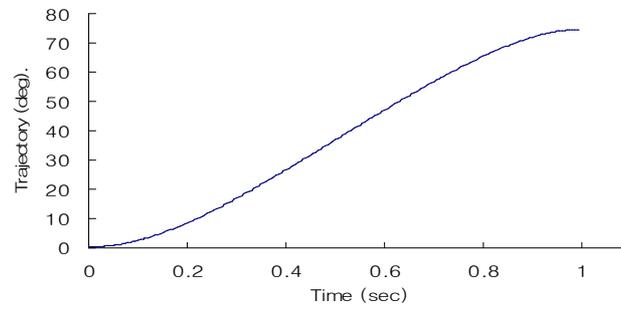


Fig. 3.9(a) Trajectory of the q_1

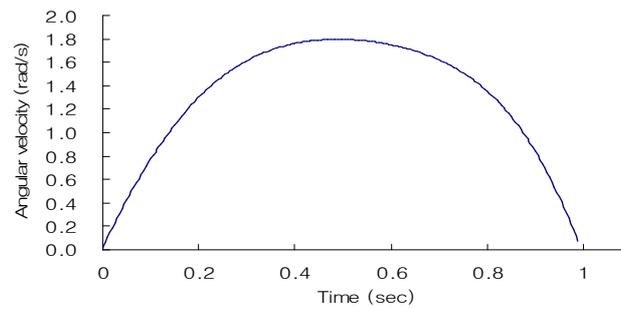


Fig. 3.9(b) Angular velocity of the q_1

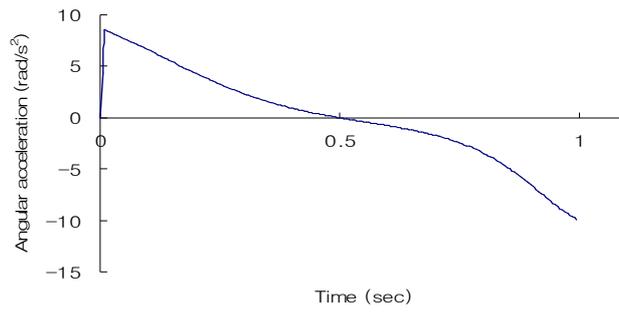


Fig. 3.9(c) Angular acceleration of the q_1

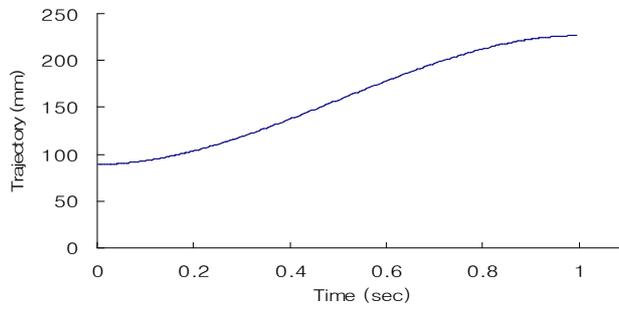


Fig. 3.10(a) Trajectory of the ballscrew in knee joint

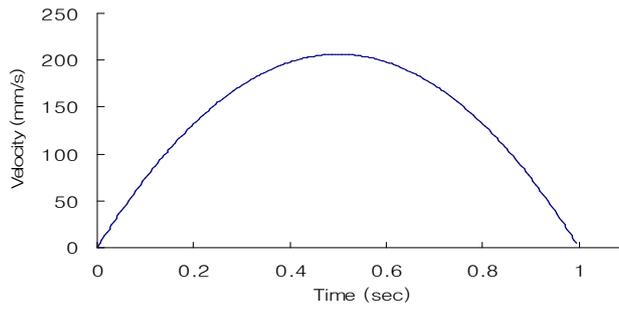


Fig. 3.10(b) Velocity of the ballscrew in knee joint

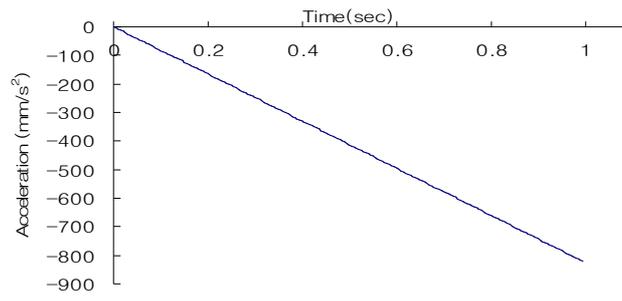


Fig. 3.10(c) Acceleration of the ballscrew in Knee joint

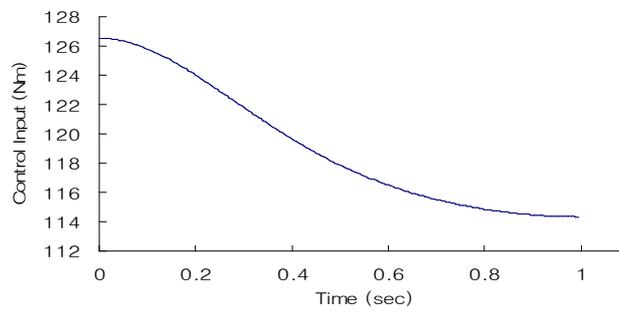


Fig. 3.10(d) Control input of the knee joint

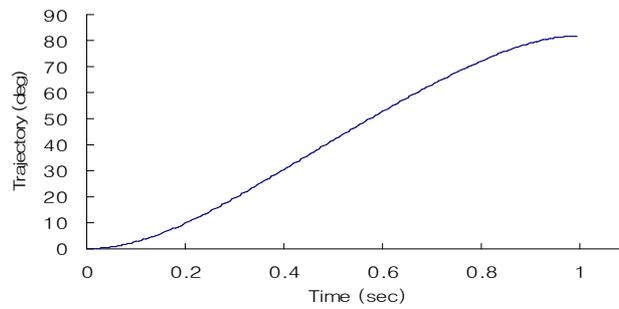


Fig. 3.11(a) Trajectory of the q_2

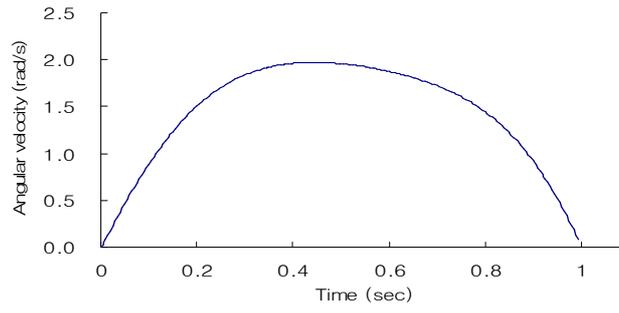


Fig. 3.11(b) Angular velocity of the q_2

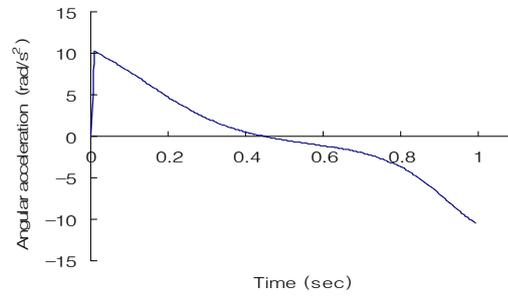


Fig. 3.11(c) Angular acceleration of the q_2

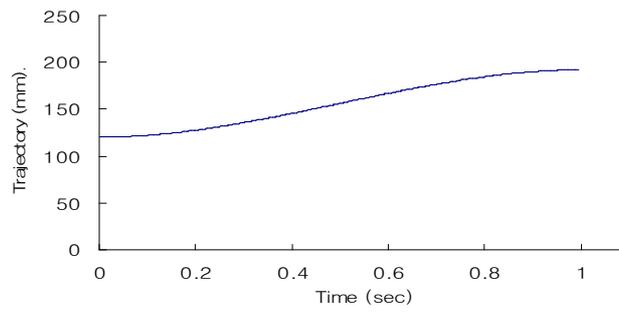


Fig. 3.12(a) Trajectory of the ballscrew in ankle joint

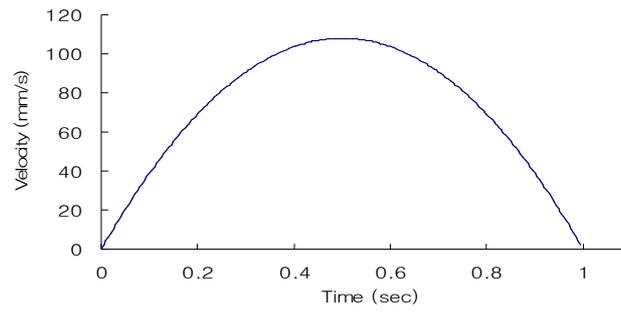


Fig. 3.12(b) Velocity of the ballscrew in ankle joint

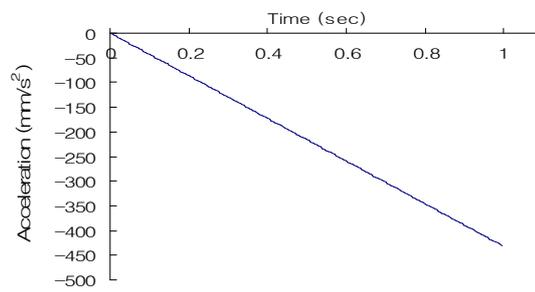


Fig. 3.12(c) Acceleration of the ballscrew in ankle joint

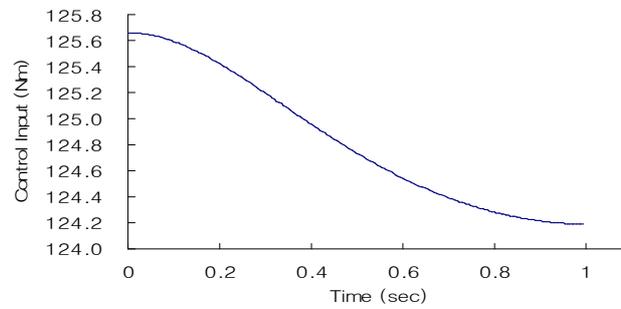


Fig. 3.12(d) Control input of the ankle joint

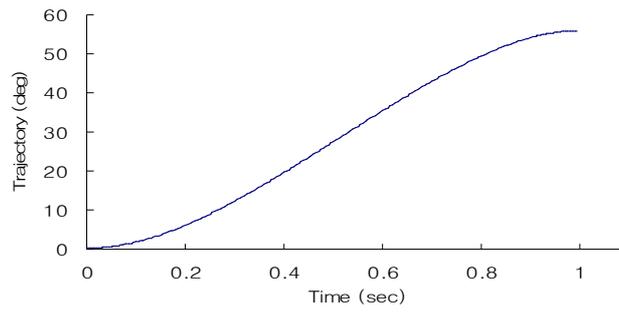


Fig. 3.13(a) Trajectory of the q_3

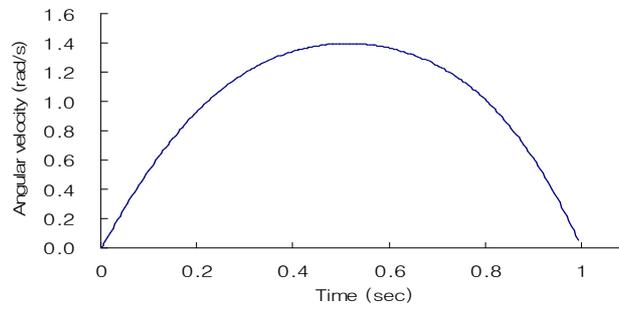


Fig. 3.13(b) Angular velocity of the q_3

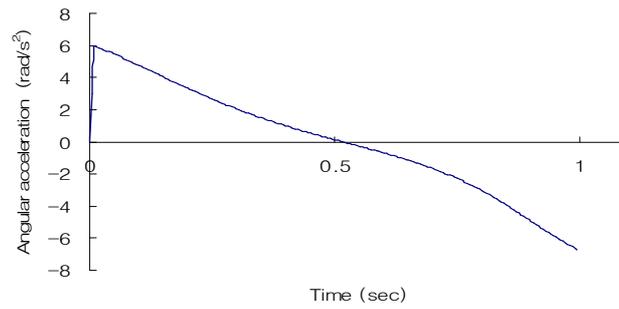


Fig. 3.13(c) Angular acceleration of the q_3

제 4 장 로봇의 관절 구동기 해석

이 장에서는 로봇 보행시 하체부분에 피치운동을 하는 사절링크 구조의 대퇴부관절, 무릎관절, 발목관절과 롤운동을 하는 발목과 허리관절의 유동적인 부하토크를 구하는 일반적인 방정식을 구한다. 이 경우는 하나의 다리로 모든 하중을 지지한다는 조건에서 이루어졌으며, 로봇 전체 무게는 가상의 머리, 몸체, 다리부분을 합쳐 73kg로 예상하였다. 하지만 대퇴부, 무릎, 발목이 기구적인 연쇄동작을 하므로 하나의 독립적인 구동이라고 보기엔 어렵다. 따라서, 모든 관절이 동시에 구동하며, 보행 동작에 따른 각 관절의 부하토크를 계산하여 선택된 모터의 적합성을 알아보려 한다.

4.1 사절링크 볼나사 공간의 구동기 부하토크 해석

각 관절 구동기의 부하토크 방정식을 유도하기 위해 도식화 하면 Fig. 4.1~4.3과 같다.

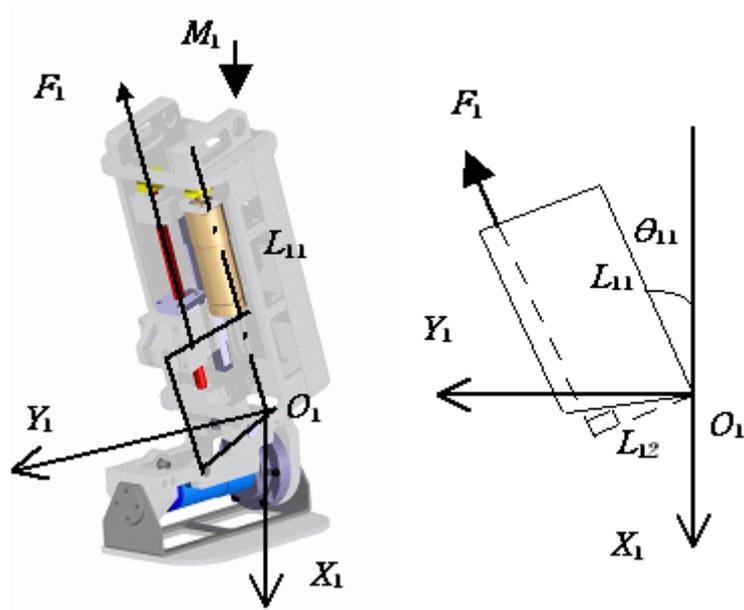


Fig. 4.1 Torque analysis of the ankle joint

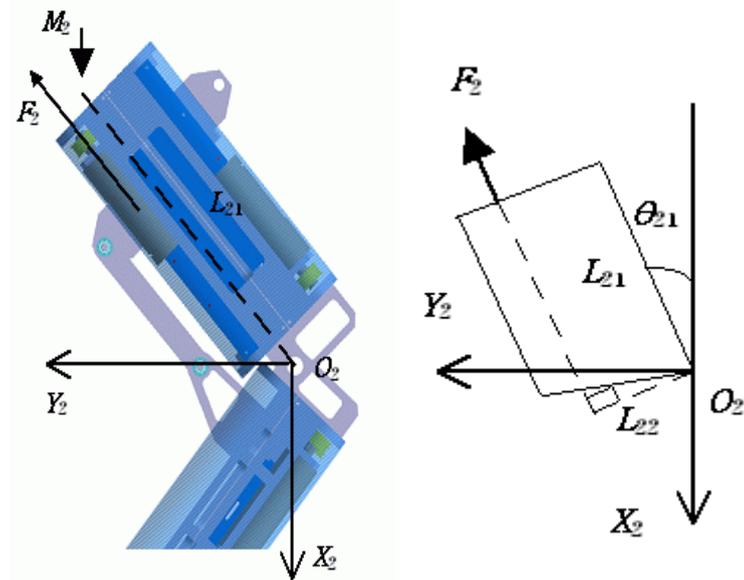


Fig. 4.2 Torque analysis of the knee joint

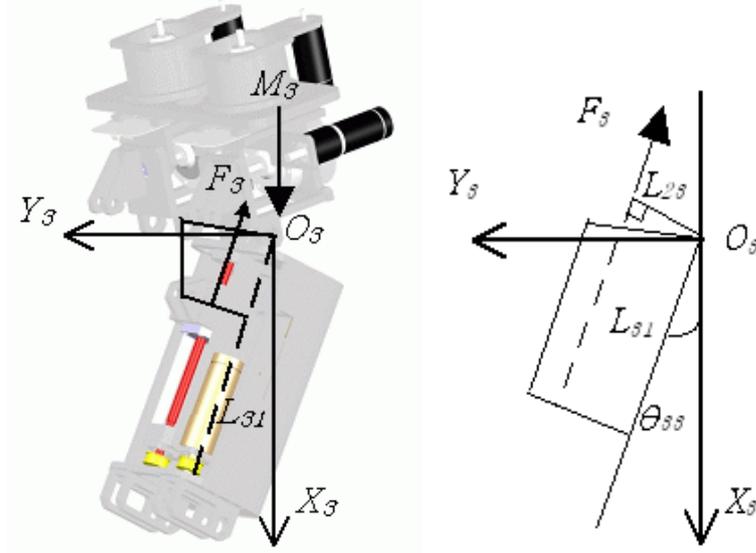


Fig. 4.3 Torque analysis of the thigh joint

보행시에는 볼 나사의 길이와 θ_{i1} 가 변하게 되므로 볼 나사 축 방향의 외력 F_i 의 크기가 변하게 된다. 회전 중심 O_i 에 대한 모멘트 합의 원리에서 외력에 대한 각 관절부의 관계식을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$F_1 = \frac{M_1 \cdot L_{11} \cdot \sin \theta_{11}}{L_{12}} \quad (4.1)$$

$$F_2 = \frac{M_2 L_{21} \sin \theta_{22}}{L_{22}} \quad (4.2)$$

$$F_3 = \frac{M_3 L_{31} \sin \theta_{33}}{L_{23}} \quad (4.3)$$

여기서, M_i 는 한쪽 다리가 지면을 지지할 때의 자중으로 대퇴부관절에서는 M_1 은 35kgf, M_2 는 55kgf, M_3 는 65kgf 이다. 각 관절부의 볼나사에 작용하는 축 방향의 부하 하중에 대한 토크를 계산하는 방정식은 다음과 같다.

$$\tau_{Motorload,i} = \frac{F_i \cdot l_b}{2\pi \cdot \eta} \cdot A \quad (4.4)$$

위 식에서 l_b 는 볼나사의 리드, η 은 볼나사의 효율 A 는 모터의 감속비이며 각 관절의 사양을 Table 4.1에 나타내었다.

Table 4.1 Constants of the load torque in each joint

Body name	Lead of ballscrew l_b [mm]	Efficiency of ballscrew η [%]	Reduction
Ankle	4 mm	90%	1 : 5.5
Knee	4 mm	90%	1 : 5.8
Thigh	4 mm	90%	1 : 5.5

따라서, 식(4.4)을 적용하여 로봇이 보행할 때마다 구동기에 작용하는 부하토크를 계산하여 시뮬레이션 결과를 Fig. 4.4~4.6 에 나타내었다.

여기서, 관절각의 범위는 통상적으로 반복된 실험에 의해서 경험적으로 정해진 것이므로 초기값을 아래와 같이 정해두고 시뮬레이션을 행하였다.

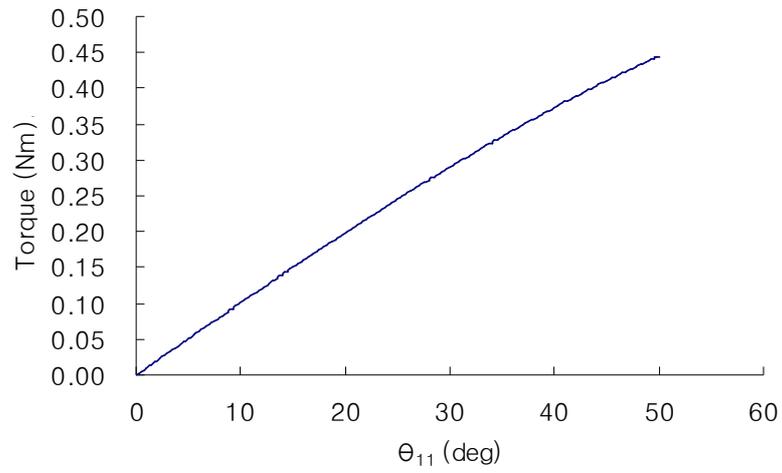


Fig. 4.4 Load torque of the ankle joint

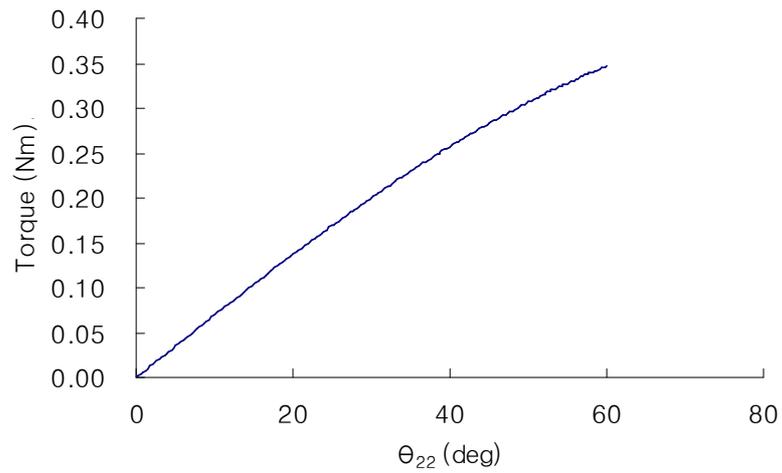


Fig. 4.5 Load torque of the knee joint

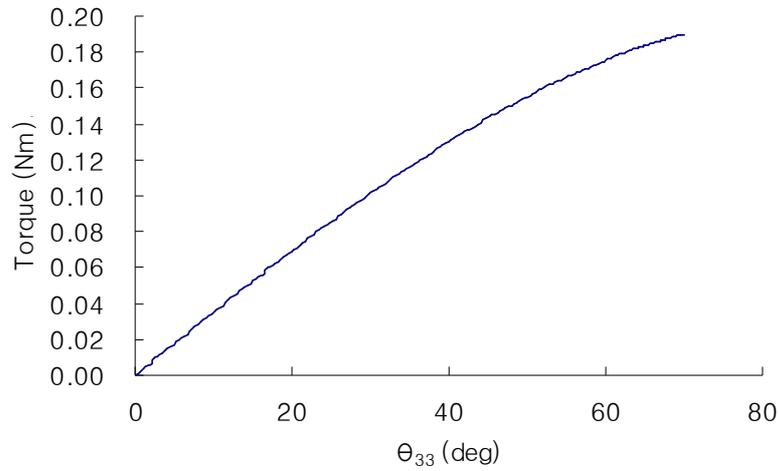


Fig. 4.6 Load torque of the thigh joint

각 관절의 변위각 θ_i 가 변함으로써, Fig. 4.4 와 Fig. 4.5 Fig. 4.6 에서 나타난 바와 같이, 비슷한 형태의 부하토크가 발생하였고, Fig. 4.4 에서의 발목과 무릎관절 부분에서만 부하토크 값이 다른 부분보다 크게 발생하였다. 이것은 실제 구동기를 적용함에 있어서 다르게 작용한다는 것을 알 수가 있으며, 실제 사용한 감속기를 장착한 모터의 정격토크보다 낮게 작용하므로 선정된 모터의 안전성을 확인 할 수 있었다. 이러한 결과는 실제로 보행시 지지하는 부분에서 발목과 무릎관절 구동기에 하중이 많이 걸린다는 것을 의미한다.

4.2 사절링크 구동기의 성능시험

로봇하체에 사용된 구동기의 성능실험을 하기 위하여 본 논문에서는 전류시험을 하였다. 전류시험은 앞서 언급한 구동기해석 조건에 의거하여 실험 된 것이며 성능시험을 통한 결과를 피드백하여 성능을 개선시키는 것을 목적으로 한다. 성능개선을 위해서는 큰 용량의 모터 사양이 요구되거나, 아니면, 프레임의 중량을 줄이는 방법이 있다. 그리고 이를 통하여 개발된 구동기의 최대 용량을 예측할 수 있다. 전류시험은 추정전압과 실제의 전압의 차이, 데이터 값을 계산한 전류값, 즉 아날로그 전압계에서 실제 측정된 전류를 기록하여 오차를 분석하고 실제 데이터를 측정하였으며 전체 시스템의 구성은 Fig. 4.7 과 같다.

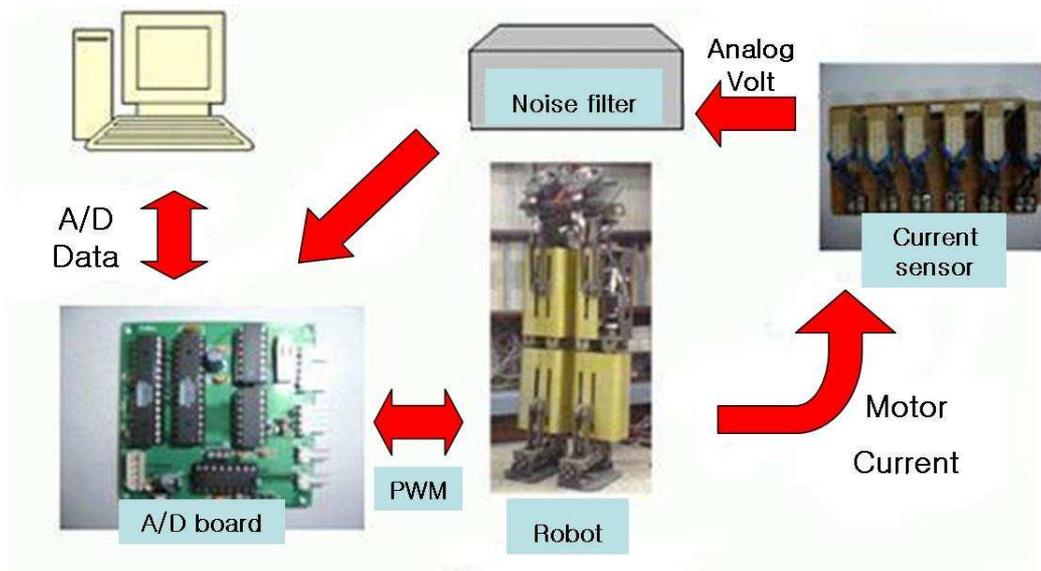


Fig. 4.7 System composition of the current test

전류 실험은 모터 구동시에 전류를 전류 센서를 이용하여 측정하여 그 값을 필터링하여 A/D 변환을 거쳐 실제 전류를 계산하는 방식으로 여기서 전류 센서는 30A~500A를 측정할 수 있는 전류 센서를 사용하여 측정하였다. 전류 센서는 감는 도선의 회전 수에 따라서 실제 2" 만큼 반비례 하여 측정 범위가 줄어들게 되는데(여기서 n 값은 감는 수) 이유는 도선수가 많으면 측정 범위에 대한 오차가 커지게 된다. 본 실험에는 전선을 10바퀴 감싸서 먼저 센서의 용량을 추정하고 실제 사용전류와 비교하여 측정범위 값을 산출 하였다. 전류 센서의 출력은 최대측정치 일때 4V를 출력하도록 하였고 이를 마이크로 프로세스를 사용하여 AD변환을 하였을 때 9bit A/D 데이터 값은 819.2 이다. 이것을 이용하여 실제의 전류 값을 비례적으로 계산하여 측정 할 수 있는 전류의 최대치를 구하였다.

개발된 관절 구동기는 보행로봇에 적용하기 위한 구동기로서 실제 로봇의 하체, 골반관절을 17kg의 부하로 최대 운동 각도인 0도에서 75도 까지 $0 \leq t \leq 5$ 초 동안 정속으로 움직이는 형태로 하였으며 구동에 따른 전류는 Fig. 4.8 과 같다.

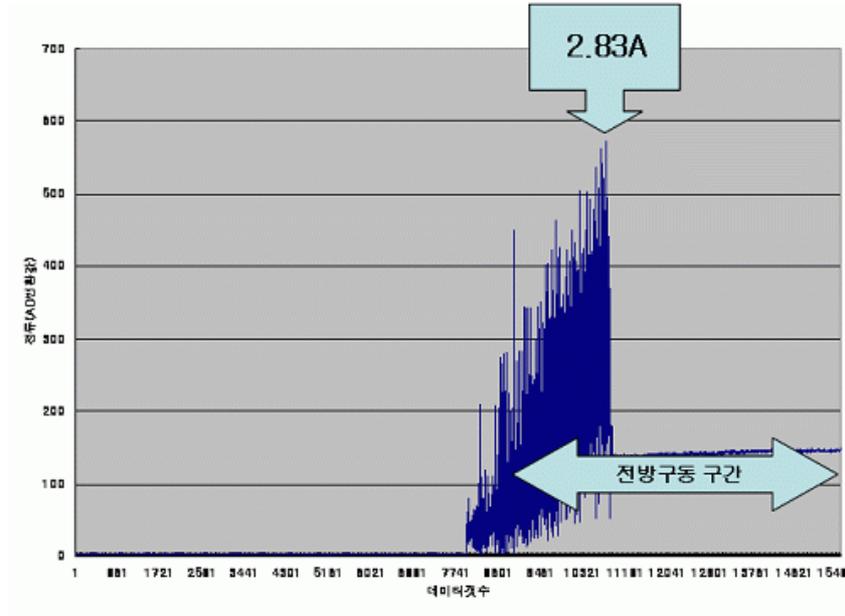


Fig. 4.8 Current data

Fig. 4.8의 전류에서 측정된 전류값은 전방구동시의 최대 전류 값이며 이에 따른 모터의 토크, 구동기의 직선추력, 구동기의 발생 추력은 다음 식으로 구할 수 있다.

$$T_{motor} = 32kg \cdot mm / A \quad (4.5)$$

$$F_{actuator} = \frac{2\pi \times n_{\text{볼나사 효율}} \times T}{l_{\text{볼나사 리드}}} \quad (4.6)$$

$$T_{actuator} = F_i \times p_i \sin \phi_i \quad (4.7)$$

식(4.7)을 이용하여 구해진 관절각에 따른 구동기의 발생토크는 Fig. 4.9와 같으며 Table 4.2에서는 실험 결과를 정리하였다.

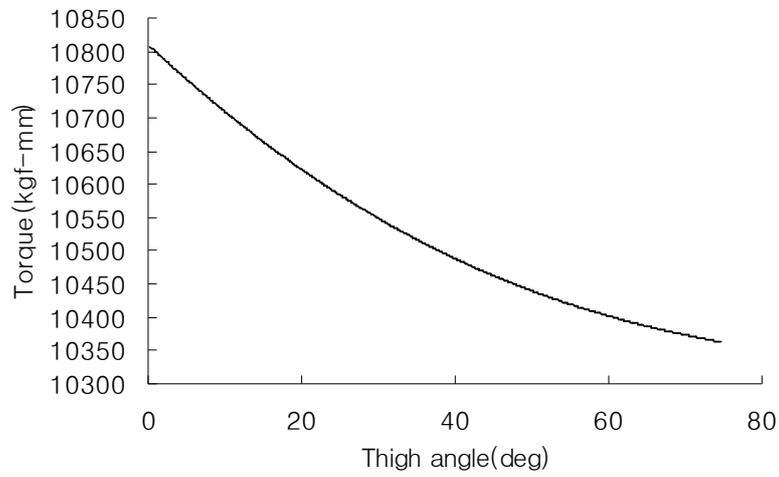


Fig. 4.9 Torque of the thigh joint

Table 4.2 Test of the result

Result Actuator	l_b (mm)	A_{Max} (A)	T_{motor} (kgf-mm)	$F_{actuator}$ (kgf)	$T_{actuator}$ (kgf-mm)	t (sec)
Thigh	4	2.83	90.56	128.3	10800	0~5

위의 표는 17kg 부하시 나타낸 구동기의 성능평가이며 결과 값과 비교하여 구동기의 최대 성능을 예측 할 수 있다. 구동기의 모터는 최대 10A까지 전류를 사용 할 수 있으며 10A 사용시 예측 되는 결과는 Table 4.3 과 Fig. 4.10 과 같다.

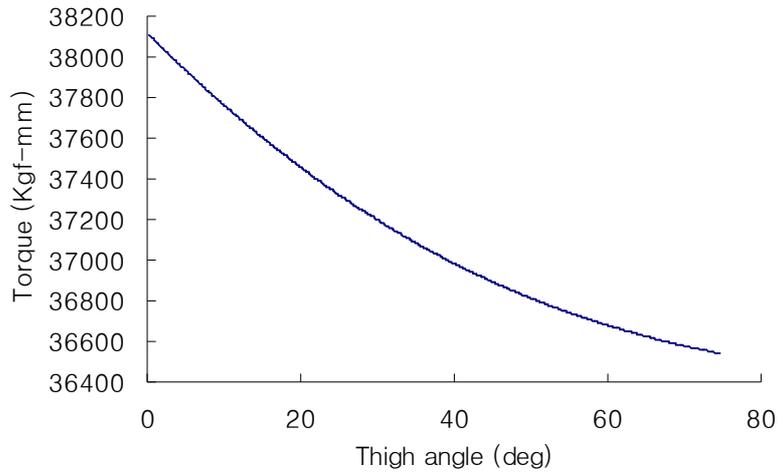


Fig. 4.10 Torque of the thigh joint using max current

Table 4.3 Result of using max current

Result Actuator	l_b (mm)	A_{Max} (A)	T_{motor} (kgf-mm)	$F_{actuator}$ (kgf)	$T_{actuator}$ (kgf-mm)	t (sec)
Thigh	4	10	320	452.4	38150	0~5

Table 4.3에서 볼 수 있듯이 10A 구동시 구동기가 발생시키는 토크는 38150kgf-mm 로 예상되며 이 수치는 17kg부하시의 3.5 배에 달하는 값이다. 그러므로 10A로 구동하였을 때는 60 kg 이하의 부하를 견딜 수 있음을 예측할 수 있다. 골반관절 구동기는 7kg 정도의 가벼운 구동기임을 가만하면 자중에 약 9배 이상의 용량을 가진 높은 성능의 구동기임을 확인 할 수 있다.

또한 4절링크 구동기는 볼나사의 용통성 있는 교체가 그 장점이라 할 수 있다. 그러므로 볼나사의 리드를 2mm로 교체 하였을 때 예상되는 성능을 Fig. 4.11과 Table 4.4에 정리 하였다.

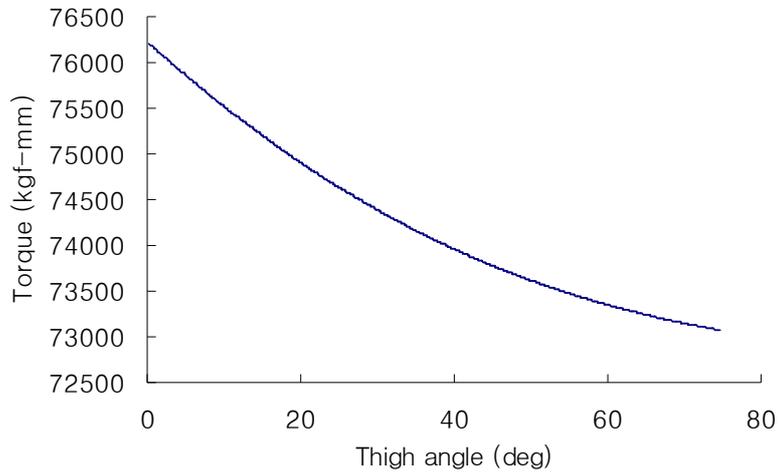


Fig. 4.11 Relation of the thigh joint torque and ballscrew force

Table 4.4 Result of replacing ballscrew

Result Actuator	l_b (mm)	A_{Max} (A)	T_{motor} (kgf-mm)	$F_{actuator}$ (kgf)	$T_{actuator}$ (kgf-mm)	t (sec)
Thigh	2	10	320	904.7	76250	0~5

Table 4.4 에서 볼 수 있듯이 볼나사의 리드의 변경은 구동력에 비례되어 나타나게 되며, 2mm의 볼나사를 사용하였을 경우의 최대치는 변경전의 2배에

가까운 110kg로 예상할 수 있다. 물론 이와 같은 고하중에도 충분한 안정성을 확보하는 것은 구동기 자체의 정밀한 강도 해석이 필요하고 또한 볼나사의 리드 변화는 구동기의 운동속도에 밀접한 관계를 가지고 있다. 그러나 기구부의 정밀한 해석과 LM가이드의 최적 배치로 어느 정도의 안정성을 확보할 수 있으며 속도문제는 사용 모터의 적절한 대응으로 충분히 대처 할 수 있다고 판단된다. 그러므로 사절링크 구동기는 이족보행로봇용 구동기로서 충분한 가능성을 가지고 있다. 또한 고용량 작업을 충분히 소화할 수 있는 산업용 로봇으로 그 효과가 기대 된다.

제 5 장 결론

본 논문에서는 기존의 개발된 25자유도 이족보행로봇(KUBIR)의 구조적 문제점을 보완하기 위하여 새로운 구조의 12자유도 로봇하체 KUBIR-2를 개발하였다. KUBIR-2의 개발 목표는 새로운 형태의 구동기를 가지는 로봇으로 보다 더 유연한 보행이었다. KUBIR-2는 2배의 보행 속도 향상과 관절의 운동반경의 증대로 기존의 로봇보다 더욱 인간과 유사한 동작의 보행을 기대 할 수 있게 되었다. 개발된 로봇의 특성을 파악하기 위하여, 실제 보행시 중요한 역할을 하는 사절링크 구조의 기구학 및 동역학 방정식을 유도하였다. 또한, 현재 개선된 이족보행로봇에 사용된 구동기가 적합한지를 검증하기 위해서 하체부분에 피치운동을 하는 사절링크구조의 골반관절, 무릎관절, 발목관절의 유동적인 부하토크를 구하는 일반적인 방정식을 유도하여 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하였다. 컴퓨터 시뮬레이션 결과를 토대로 각 관절에 작용하는 부하토크를 분석하여 선정된 모터의 적합성을 확인함으로써 이론과 실제 적용의 타당성을 확인할 수가 있었다. 마지막으로 부하가 있을 때의 구동기의 성능을 구동모터 전류값을 측정함으로써 분석하였고 그 결과로 구동기의 성능분석 및 최대성능을 예측하였다. 또한 선정된 모터의 최대성능 및 볼나사의 교체에 따른 구동기의 성능변화를 분석하여 로봇 구동기의 유통성을 확인 하였다. 이족보행로봇은 가격대비 작업효과가 매우 떨어지는 형편이다. 하지만 4절링크를 이용한

이족보행로봇은 강력한 토크를 기반으로 로봇의 효율성을 매우 높일 수 있을 것이다. 따라서 본 연구의 결과는 인간환경에서 직접 일을 할 수 있는 높은 효율성을 가진 이족보행로봇의 개발에 기여할 수 있을 것이다.

향후 12자유도의 하체만 개발된 상태인 로봇을 완전한 휴머로이드 로봇으로 연구를 진행하는 것이 필요하다. 그리고 로봇에 비전 시스템 및 네트워크 기능이 추가된 지능형 보행로봇의 개발을 병행하여야 할 것이다.

참고문헌

- [1] M. Vukobratovic, A. A. Frank, and D. Juricic. *On the Stability of Biped Locomotion*. Proc. IEEE Transactions on Biomedical Engineering, Vol. BME-17, No.1, pp. 25~36, 1970.
- [2] M. Vukobratovic. *Mathematical Models of Legged Locomotion Robots*. Mihailo Pulpin Institute Beograd, 1975.
- [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 and 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 and 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] 박인규, 김진결, 김기식, " 이족 보행 로봇을 위한 슬라이딩 제어기 설계", 한국정밀공학회지 제18권 제5호(2001년 5월), pp. 137~146, 2001.
- [9] Sun-Ho Lim and Jin-Geol Kim, "Biped Locomotion with Mechanical Compliance.", (In Korean) Korea Robotics and Automation Workshop Conference, pp.21~25, 1992.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 임선호, "이족보행로봇 IWR-III의 균형점 제어구현에 관한 연구.", 인하대학교 대학원 논문집, 1999.
- [13] Kenneth J. Waldron, "Realization of Dynamic Biped Walking Stabilized with Trunk Motion Under Known External Force." Advanced Robotics, pp.299~310, 1989.
- [14] 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.
- [15] Jin-ichi YAMAGUCHI, Astuo TAKANISHI, and Ichiro KATO, "Development 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.
- [16] M. Yamada, J. Furusho and A. Sano, "Dynamics Control of Walking Robot with Kick-Action.", ICAR, pp.405~412, 1985.
- [17] Kazuo Hirai, Masato Hirose, Yuji Haidawa and Toru Takenaka, "The Development of Honda Humanoid Robot.", International Conference on Robotics & Automation Proc. of IEEE, pp.1321~1326, 1998.
- [18] 김정엽, 박일우, 오준호, "인간형 로봇 플랫폼 KHR-2의 설계 및 하드웨어 집성", 대학기계학회 추계학술대회 논문집, pp. 579~584, 2004.
- [19] Hyeung-Sik Choi, Jung-Min Oh, Chang-Yeol Beak and Kyung-Sik Jung, "Development of a Biped Walking Robot Actuated by a Closed-Chain Mechanism.", ICASS 2003 , pp. 209~214, 2003.
- [20] 김창부, 조현석, "이족보행로봇의 궤적의 최적화 계획에 관한 연구", 한국정밀공학회지 제 15권 제 3호(1998년 3월), pp. 157~167, 1998.
- [21] 박인규, 김진걸, "이족보행로봇의 동적 보행계획과 역동역학 해석", 한국정밀공학회 제17권 제9호, pp. 133~144, 2000.

감사의 글

드디어 논문을 마치고 짧았던 대학원 시절을 마감하게 되었습니다. 먼저 저를 믿고 기다려 주신 부모님과 저를 물심양면 도와주신 누님들에게 이 글로써 감사하다는 말을 전해 드리고 싶습니다. 본 논문에서 부족한 점을 지적하여 수정할 수 있도록 도와주신 심사위원장 왕지석 교수님과 심사위원 조종래 교수님께 감사 드립니다. 그리고 언제나 함께하며 저를 지도해주신 지도교수 최형식 교수님께 정말 감사 드립니다.

저에게 좋은 동료들이 있었습니다. 옆자리에서 항상 저에게 힘이 되어주고 프로그램을 도와주신 성덕이 형님, 상준이, 병국이, 응주군, 동연이, 근화, 태형이형 모두에게 감사하고 앞으로 실험실을 잘 이끌어 나갈 것이라 믿습니다. 특히 근화와 동연이에게 고맙다는 말을 전하고 싶습니다. 그리고 실험실의 착하고 귀여운 학부생들 경기, 동찬, 종훈이, 동현이에게 고마움을 표하며 함께한 시간들이 너무나 즐거웠습니다. 마지막으로 저의 동문선배이자 대선배인 영식이형과 귀여운 후배 우현이에게도 감사함을 표합니다.

부족한 제가 힘든 대학원 생활을 마칠 수 있었던 것은 선후배님들과 저의 친구들이 있었기에 가능했습니다. 사회에 나가서도 실험실 식구들을 잊지 않고 도움이 될 수 있는 선배가 되겠습니다. 저에게 실험실 생활은 너무도 짧게 느껴집니다. 하지만 교수님과 선후배님들과의 시간을 영원히 기억할 것입니다.