

공학석사 학위논문

인간의 움직임을 적용한 인체크기의
이족보행로봇 설계 및 기구학 해석

Design and Kinematics Analysis of a Human-Sized Biped
Walking Robot applied to Motion of Human

지도교수 최형식

2008년 2월

한국해양대학교 대학원

기계공학과

이종훈

本 論文을 李宗勳의 工學碩士 學位論文으로 認准함.

위 원 장 왕 지 석



위 원 최 형 식



위 원 조 종 래



2008 년 2 월

한국해양대학교 대학원

목 차

Abstract

기호설명

그림목차

표목차

제 1 장 서론	1
제 2 장 이족보행로봇의 구성	3
2.1 이족보행로봇 전체시스템 구성	5
2.2 이족보행로봇 머리 기구부 구성	8
2.3 이족보행로봇 허리 기구부 구성	10
2.4 이족보행로봇 팔 기구부 구성	11
2.5 이족보행로봇 하체 기구부 구성	15
2.6 이족보행로봇 제어시스템 구성	20
제 3 장 이족보행로봇의 기구학 해석	22
3.1 이족보행로봇 D-H 구성	22
3.2 이족보행로봇 머리 기구학 해석	27
3.3 이족보행로봇 팔 기구학 해석	30
3.4 이족보행로봇 다리 기구학 해석	35
3.5 이족보행로봇의 기구학적 상호관계 적용	40
제 4 장 이족보행로봇의 관절 구동기 해석	41
4.1 4절 링크의 관절 관계식	41
4.2 4절 링크 구조의 관절 구동기 부하토크 해석	47
4.3 4절 링크 구조의 관절 구동기 해석 데이터	52
제 5 장 이족보행로봇의 기구부 구조해석	55
5.1 유한요소 모델	55
5.2 유한요소 해석	57
제 6 장 이족보행로봇의 외장케이스 설계	63
6.1 외장케이스의 3D 설계와 금형 제품	63

6.2 외장케이스의 경량화	65
제 7 장 결론	66

Design and Kinematics Analysis of a Human-Sized Biped Walking Robot applied to Motion of Human

Jong-Hoon Lee

Department of Mechanical Engineering
Graduate School, Korea Maritime University

Abstract

This thesis is about 27 degree-of-freedom humanoid robot named KUBIR-3 which has height of 170cm and weight of 72kgf. KUBIR-3 is composed of four parts: the head, body, arms and legs. The head part is composed of two degree-of-freedom which are directly connected by the actuator motor and speed reducer. The body was designed to have one degree-of-freedom to give roll motion of the robot. The arms were designed to have six d.o.f where three joints are composed of the four-bar-link joint actuator and the other were designed to have the actuator motor with the speed reducer as the harmonic driver. The legs were designed to have six d.o.f. where three joints are composed of the four-bar-link joint actuator and the other were designed to have the actuator motor with the speed reducer as the harmonic driver. At the shoulder, elbow, and wrist joints of arms and at the thigh, knee, and ankle joints of legs, the four-bar link joint actuator was applied to transfer the heavy loads.

To analyze the kinematics of KUBIR-3, the D-H convention was applied to the joints of the robot. For this, the center of the robot body was selected as the base coordinate. Based on this, the relative positions of the arms and legs were defined. Also, using this, the inverse kinematics analysis was made.

The strain and stress analyses for links of the arm and leg of the KUBIR-3 were

made by the FEM analysis using the CATIA. To do these, modeling of the arm and leg was made. The results of the simulation showed the safe design of the link of the arm and leg.

For the analysis of the four-bar link joint of KUBIR-3, static force equation according to the load torque was analyzed. The analyzed data of this equation showed the validity of the appropriate choosing of the actuator motors for supporting heavy loads. The case molding of the KUBIR-3 was designed and constructed based on the 3D modeling using the CATIA

기 호 설 명

A_i	각 관절의 i 좌표계에 대한 동차 변환 행렬
T_i^j	각 기구부의 i 좌표계에 대한 j 좌표계까지의 동차 변환 행렬
θ_i	각 기구부의 회전 관절 i 번째의 관절 변수
p_i	각 기구부 i 의 말단 위치벡터
l_i	4절 링크의 i 의 링크길이
ϕ	4절 링크의 관절 변형량 각
d	4절 링크의 미끄럼 변형량
M_i	4절 링크에 작용하는 기구부 i 의 자중
F_i	각 관절에 가해지는 i 의 미끄럼 방향의 힘
τ_i	각 관절의 회전중심에 작용하는 i 의 토크

그림 목 차

Fig. 2.1 Structure of KUBIR-1	4
Fig. 2.2 Structure of KUBIR-2	4
Fig. 2.3 Structure of KUBIR-3	4
Fig. 2.4 Structure of four bar link	5
Fig. 2.5 Front and side view of the head	8
Fig. 2.6 Rotation range of the head	8
Fig. 2.7 The waist frame and joint	10
Fig. 2.8 Gravity compensator of the waist joint	10
Fig. 2.9 3D model of the shoulder joint	11
Fig. 2.10 Rotation range of the shoulder pitch joint	11
Fig. 2.11 Shoulder joint	11
Fig. 2.12 3D model of the elbow joint	12
Fig. 2.13 Rotation range of the elbow pitch joint	12
Fig. 2.14 Elbow joint	12
Fig. 2.15 3D model of the wrist joint	13
Fig. 2.16 Rotation range of the wrist pitch and yaw joint	13
Fig. 2.17 Wrist joint	13
Fig. 2.18 3D model of the pelvis joint	15
Fig. 2.19 Rotation range of the pelvis yaw and roll joint	15
Fig. 2.20 Pelvis joint	15
Fig. 2.21 3D model of the thigh joint	16
Fig. 2.22 Rotation range of the thigh pitch joint	16
Fig. 2.23 Thigh joint	16
Fig. 2.24 3D model of the knee joint	17
Fig. 2.25 Rotation range of the knee pitch joint	17
Fig. 2.26 Knee joint	17
Fig. 2.27 3D model of the ankle joint	18
Fig. 2.28 Rotation range of the ankle pitch and roll joint	18
Fig. 2.29 Ankle joint	18
Fig. 2.30 Motor Controller	20
Fig. 2.31 Motor Driver	20

Fig. 2.32 Total control system of the KUBIR-3	21
Fig. 3.1 D-H coordinates for the KUBIR-3	24
Fig. 3.2 D-H coordinates for the head	27
Fig. 3.3 D-H coordinates for the arm	30
Fig. 3.4 D-H coordinate for the leg	35
Fig. 4.1 Four-bar link structure	41
Fig. 4.2 Four-bar link modeling for the shoulder joint	43
Fig. 4.3 Four-bar link modeling for the elbow joint	44
Fig. 4.4 Four-bar link modeling for the wrist joint	44
Fig. 4.5 Four-bar link modeling for the thigh joint	45
Fig. 4.6 Four-bar link modeling for the knee joint	45
Fig. 4.7 Four-bar link modeling for the ankle joint	46
Fig. 4.8 Torque analysis of the shoulder joint	47
Fig. 4.9 Torque analysis of the elbow joint	48
Fig. 4.10 Torque analysis of the wrist joint	48
Fig. 4.11 Torque analysis of the thigh joint	49
Fig. 4.12 Torque analysis of the knee joint	49
Fig. 4.13 Torque analysis of the ankle joint	50
Fig. 4.14 Torque analysis of the shoulder joint	52
Fig. 4.15 Torque analysis of the elbow joint	52
Fig. 4.16 Torque analysis of the wrist joint	53
Fig. 4.17 Torque analysis of the thigh joint	53
Fig. 4.18 Torque analysis of the knee joint	54
Fig. 4.19 Torque analysis of the ankle joint	54
Fig. 5.1 Finite element model of the arm product	55
Fig. 5.2 Finite element model of the leg product	56
Fig. 5.3 Displacement of the KUBIR-3 arm	58
Fig. 5.4 FEM stress result of the KUBIR-3 arm	59
Fig. 5.5 FEM displacement result of the KUBIR-3 arm	59
Fig. 5.6 Displacement of the KUBIR-3 leg	61
Fig. 5.7 FEM stress result of the KUBIR-3 leg	62
Fig. 5.8 FEM displacement result of the KUBIR-3 leg	62
Fig. 6.1 3D model of the KUBIR-3 cases	63
Fig. 6.2 The KUBIR-3 cases	64

표 목 차

Table 2.1 Specification of KUBIR-series	3
Table 2.2 Specification of KUBIR-3	6
Table 2.3 Degree of freedom of KUBIR-3	7
Table 2.4 Specification of the joint actuator for head part	9
Table 2.5 Specification of the joint actuator for arm part	14
Table 2.6 Specification of the joint actuator for leg part	19
Table 3.1 Link parameter for the KUBIR-3 head	25
Table 3.2 Link parameter for the KUBIR-3 arm	25
Table 3.3 Link parameter for the KUBIR-3 leg	26
Table 4.1 Length of the link	43
Table 4.2 Constants of the load torque in each joint	51
Table 5.1 Material property	56
Table 5.2 Element type and number	56
Table 5.3 Displacement and stress of the KUBIR-3 arm	57
Table 5.4 Displacement and stress of the KUBIR-3 leg	60
Table 6.1 Material weight of the robot cases	65

제 1 장 서론

오늘날 로봇은 로봇공학이라 하여 기구학(kinematics), 동역학(dynamics), 제어(control)와 같이 다양한 분야가 서로 상호 작용하는 최첨단 분야이다. 그렇기에 로봇에 관한 연구는 다양한 분야에 종사하는 연구원들이 서로 협력하여야 최고 목표점에 도달 할 수가 있다.

현재 로봇에 관한 연구 분야는 산업용 자동화 로봇, 극한 환경의 탐사 로봇, 가정용 생활 로봇, 인간을 모방한 이족보행로봇 등 다양한 목적으로 세계에서 연구가 진행 중에 있다. 그리고 인간의 실생활에 직접적으로 편의를 제공할 수 있는 로봇 개발의 노력도 꾸준히 진행되어 왔는데, 그 연구의 중심이 바로 이족보행로봇이다[14]. 2000년에 개발된 혼다(Honda)-아시모(Asimo)의 발표가 이족보행로봇에 대한 연구개발의 촉진제로 보며 여러 단체에서 로봇에 대한 관심이 부각되기 시작 하였다. 이족보행로봇에 대한 연구는 현재까지 단연 일본이 선두이며, 이를 연구하는 기관도 혼다(Honda), 소니(Sony), 가와다(Kawada), 후지쓰(Fujitsu), 도요타(Toyota), AIST, 동경대, 와세다대 등 기업 및 대학에 이르기까지 폭 넓은 기관에서 연구가 되고 있다[1-3,13]. 물론 한국 대표 연구기관인 KAIST에서의 휴보(HUBO)가 있다. 이렇게 국내에서도 뒤늦게 여러 기업 및 대학에서 활발히 로봇의 연구개발이 진행되고 있다. 로봇 기술력도 일본 못지않게 세계적으로 인정을 받고 있는 현실에 있다. 보행로봇 기술의 연구는 1960년대 후반 Vokobratovic의 이족보행로봇에 관한 모델링을 제안한 이후 많은 연구가 진행되어 왔다. 동적 보행 시 로봇 걸음새 동작의 특성을 파악하고 이를 제어하는 연구[4], 3자유도 이족보행로봇의 토크를 줄이기 위하여 경로 계획을 이용한 제어[5], 5자유도의 이족보행로봇의 운동방정식을 비선형 디커플링 방법에 의해 선형화시켜 거동을 제어하는 연구[6], 토크 센서를 이용하여 9자유도의 로봇의 보행 제어[7], 로봇 운동 패턴학습[15], 보행동작의 모델링과 선형화 제어로 인한 상태공간의 안정도 해석[8], 5자유도 로봇의 모델링과 슬라이딩모드 제어를 통한 보행궤적 추적제어에 관한 연구들이 수행되었다[9, 10].

본 논문 연구배경은 기술적 측면과 산업적 측면에서 접근하였다. 기술적 측면은 볼나사 및 4절 링크를 새로운 메커니즘 구동으로 적용하였다. 이는 소형경량의 고토크 관절 구동기로 휴머노이드 개발기술을 확보하고자 하였다. 그리고 산업적 측면으로는 고중량물 이송가능한 로봇으로 극한 환경이나 산업현장에 적용하여 작업능률 향상에 도움이 되고자 한 것이다. 또한 인간과 유사한 동작의 구현 및 친숙한 이미지의 이족

보행로봇의 개선에 초점을 두었다. 그래서 기계공학을 기준으로 한 로봇 설계와 기구학 해석을 다루고자 한다. 지금까지 개발된 이족보행로봇의 메커니즘(mechanism)은 구동기(actuator)와 관절과의 운동관계가 직결 타입의 구동이지만 본 논문에서 개발된 이족보행로봇은 구동 메커니즘(mechanism)이 다른 고중량물 이송능력을 갖춘 4절 링크 구조의 관절타입을 소개 할 것이다. 그리고 기존에 연구되었던 KUBIR-1과 2에서의 동작속도와 중량, 관절의 유격현상 등의 문제점들을 보완하여 기구부의 설계에 대해 설명하였다. 따라서 본 논문의 2장에서는 개선된 KUBIR-3의 전체 시스템과 기구부의 구성 및 제원에 대하여 설명하였다. 3장에서는 KUBIR-3의 기구학 해석을 수행하여 구동에 따른 각 말단장치(end-effector)의 기구학 방정식을 유도하였다. 4장에서는 개발된 로봇 관절 구동기에 작용하는 힘들을 도식화하여 일반적인 방정식을 유도하였다. 그리고 각 관절에 사용된 구동기의 부하토크를 해석하여 이론과 실제적용의 타당성을 검토하였다. 5장에서는 자체 중량 및 외부하중에 대한 기구적인 구조해석을 실시하여 설계의 타당성을 검토하였고, 6장에서는 KUBIR-3의 외장 케이스의 금형 소개와 경량의 외장 케이스 제작에 대해 소개하였다. 마지막으로 7장에서는 결론에 대하여 설명하였다.

제 2 장 이족보행로봇의 구성

사절 링크 구조를 가진 이전의 이족보행로봇인 KUBIR-1 및 KUBIR-2들은 여러 가지 문제점을 가지고 있었다. 아래 Fig. 2.1 의 KUBIR-1 과 같은 경우는 사절 링크 구조 설계의 복잡함과 운동 반경의 제한으로 관절의 동작속도가 저속이었다. 그리고 중량이 무거운 문제도 있었다. 이를 일부 해결한 후속 모델 Fig. 2.2 의 KUBIR-2는 보다 고성능의 구동기(Actuator)를 장착하였고, 사절 링크를 모듈화하여 보다 나은 외형 디자인으로 제작하였다. 또한 불필요한 무게의 최소화와 무게중심 면에도 안정감을 구사하였다. 그러나 관절의 이음의 유격 및 로봇 움직임의 부자연스러움 등의 KUBIR-2의 단점이 있었기에 이를 더 보강한 모델이 본 논문에서 제시한 Fig. 2.3 의 KUBIR-3이다. KUBIR-3는 이전까지 실험에 의해 발견된 각 부 관절과의 조인트의 유격완화, 링크 부분의 내구성 강화, 로봇 팔의 인간과 유사한 운동 구현 등의 문제점을 해결하였다. 또한 매끈한 외장 케이스를 설치 함으로써 한층 더 부드러운 이미지로 사람들에게 친근한 로봇으로 변신하였다. Table 2.1 은 KUBIR 로봇들의 제원을 나타내고 있다.

Table 2.1 Specification of KUBIR-series

	Height (cm)	Frame weight (kgf)	DOF	Actuator
KUBIR-1	172	92	25	60W DC Servo motor
KUBIR-2	168	92	29	150W DC Servo motor
KUBIR-3	170	72	27	150W DC Servo motor

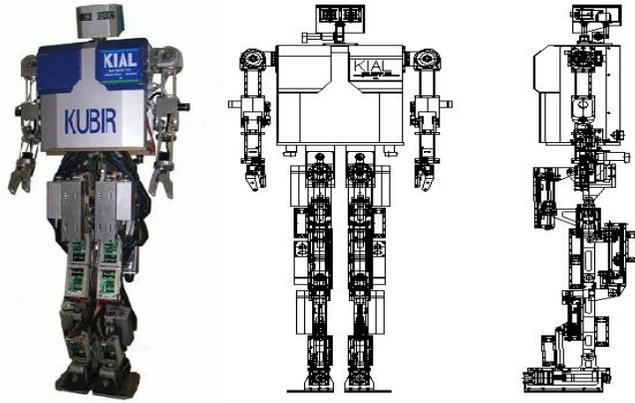


Fig. 2.1 Structure of KUBIR-1

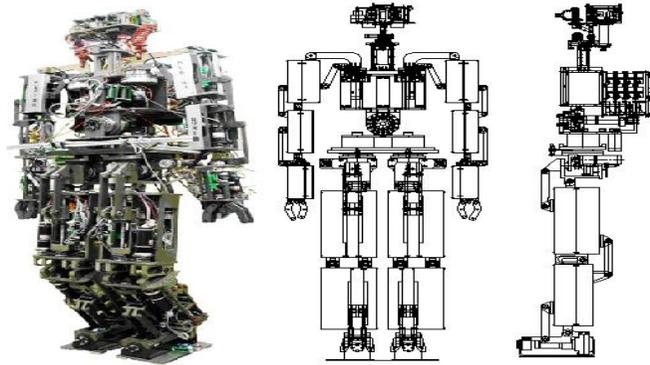


Fig. 2.2 Structure of KUBIR-2

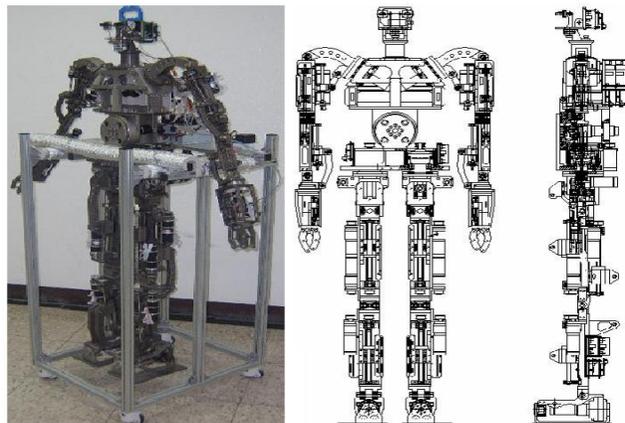


Fig. 2.3 Structure of KUBIR-3

2.1 이족보행로봇 전체시스템 구성

새롭게 개발된 KUBIR-3의 전체시스템 구성은 Table 2.2 와 Table 2.3 과 같다. 전체 로봇의 신장은 170cm, 몸무게는 72kgf이다. 머리 2자유도, 한 팔당 6자유도, 허리 1자유도, 한 다리당 6자유도의 총 27자유도를 가지는 휴머노이드 이족보행로봇이다. 로봇의 머리에는 눈에 해당하는 CCD 카메라 2대가 장착되어 있으며 머리는 yaw와 pitch운동이 가능하다. 팔의 6자유도는 어깨부터 회전(yaw)-관절(pitch)-관절(pitch)-관절(pitch)-균형(roll)의 구조와 말단장치인 그리퍼(gripper)가 사람의 손 역할로 장착되어 물건을 잡을 수 있다. 허리의 1자유도는 로봇의 보행 및 하중의 부하에 의한 무게 중심을 제어하는 역할을 담당하고 있다. 마지막으로 다리의 6자유도는 회전(yaw)-균형(roll)-관절(pitch)-관절(pitch)-관절(pitch)-균형(roll)의 구조로 되어 있어 인간과 유사한 보행을 할 수 있는 구조로 설계하였다.

그리퍼를 제외한 팔과 다리의 12자유도 중 pitch운동을 하는 6개의 관절은 모터와 관절이 직결구조가 아닌 Fig. 2.4 와 같이 볼 나사(ball-screw)를 응용하였다. 이는 직선운동을 회전운동으로 바꾸어 큰 토크(torque)를 낼 수 있는 사절 링크 구조로 되어 있다.

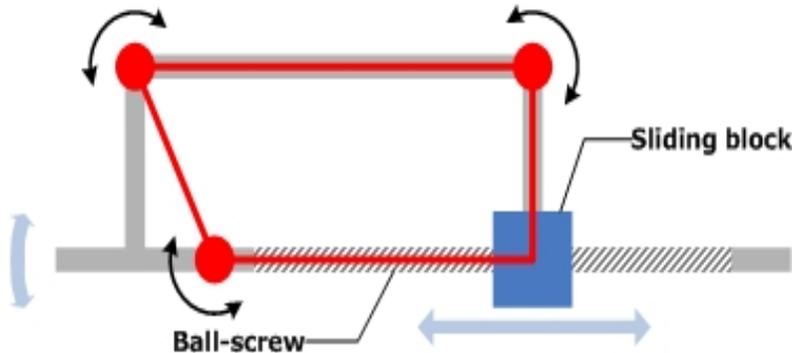


Fig. 2.4 Structure of four bar link

Table 2.2 Specification of KUBIR-3

Height	170 [cm]	
Weight	72 [kgf]	
Actuator	Arm	DC Servo motor + Harmonic speed reducer
	Leg	
	Waist	DC Servo motor + Ball Screw
	Head	DC motor
Control unit	Main controller	Embedded Single-board Computer
	Joint controller	TMS320LF2407 + Driver6
Power capacity	24V / 50AH	
Sensory device	2 CCD camera / Image grabber Tilt sensor, FSR sensor Magnetic sensor, Proximity sensor	
Operation device	Notebook PC with wireless LAN	

Table 2.3 Degree of freedom of KUBIR-3

Head	2 DOF	
Arm	Left	6 DOF (shoulder 2 + elbow 1 + wrist 2 + hand 1)
	Right	6 DOF (shoulder 2 + elbow 1 + wrist 2 + hand 1)
Waist	1 DOF	
Leg	Left	6 DOF (pelvis 2 + thigh 2 + knee 1 + ankle 1)
	Right	6 DOF (pelvis 2 + thigh 2 + knee 1 + ankle 1)
Total	27 DOF	

2.2 이족보행로봇 머리 기구부 구성

이족보행로봇의 머리는 Fig. 2.5 와 같이 2자유도를 가지고 있으며, 인간의 눈과 같은 역할을 하는 2대의 CCD 카메라가 장착되어 있어 로봇 전방의 물체를 인식하는 역할을 한다. Table 2.4 와 같이 2개의 모터가 감속기와 풀리로 직결로 연결된 관절을 구성하고 있다. 그리고 Fig. 2.6 과 같이 전방을 기준으로 상하 좌우 45°의 운동범위를 가지고 있다.

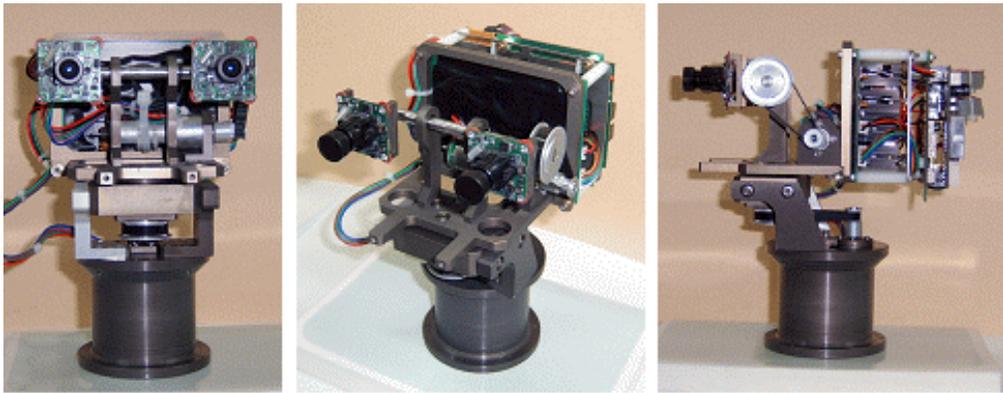


Fig. 2.5 Front and side view of the head

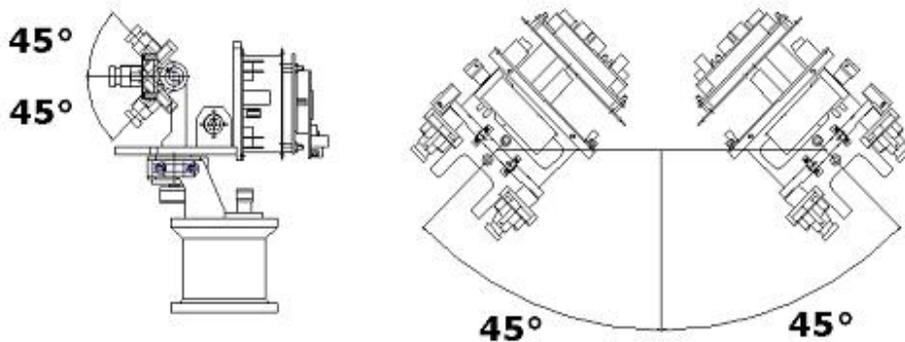


Fig. 2.6 Rotation range of the head

Table 2.4 Specification of the joint actuator for head part

Axis	Motion	Motor power [W]	Pulley ratio	Ratio of speed reducer
0	yaw	1.5	1:2.85	1:104
1	pitch	1.5	1:2.85	1:104

2.3 이족보행로봇 허리 기구부 구성

이족보행로봇의 허리는 모터와 감속기가 총 1:645로 직결 연결된 구조로 1자유도를 가진다. 그리고 Fig. 2.7 과 같이 감속기 앞에 중력 완충장치가 장착되어 스프링의 탄성력으로 로봇의 상체가 중력에 의해 기울어지는 현상을 사전에 방지 가능하다. 그리고 로봇보행 시 안정적 움직임을 구현 할 수 있다.

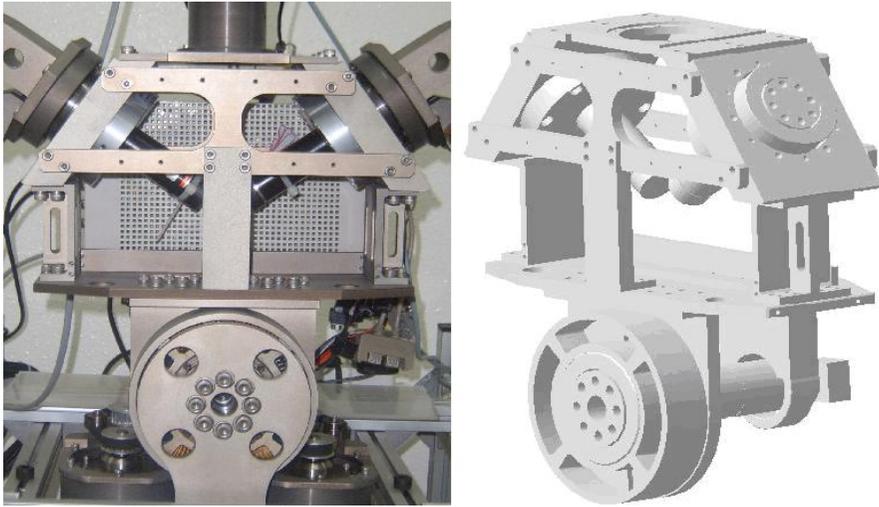


Fig. 2.7 The waist frame and joint



Fig. 2.8 Gravity compensator of the waist joint

2.4 이족보행로봇 팔 기구부 구성

이족보행로봇의 양팔은 총 12자유도를 가지고 있다. 4개의 직결구조 회전(yaw)축과 6개의 4절 링크 구조 관절(pitch)축, 그리고 2개의 말단장치인 그리퍼 1축으로 구성되어 있다. 아래 Fig. 2.9 는 어깨부분 직결구조의 회전(yaw)축이 팔 전체를 회전할 수 있도록 된 관절 구조이다. 그리고 다음 2개의 관절(pitch)축이 아래에 위치하고 있다. 어깨부분의 회전(yaw)운동은 몸체와 35°로 기울어져 있어 회전축으로 180° 운동이 가능하다. 첫 번째 관절(pitch)축은 Fig. 2.10 과 같이 로봇몸체로부터 안쪽으로 6°, 바깥쪽으로 30°의 운동범위를 갖는다.

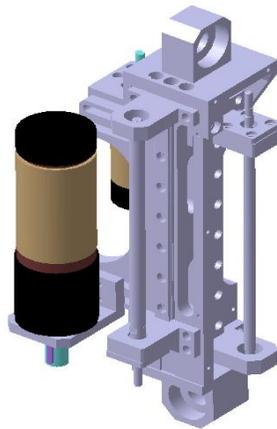


Fig. 2.9 3D model of the shoulder joint

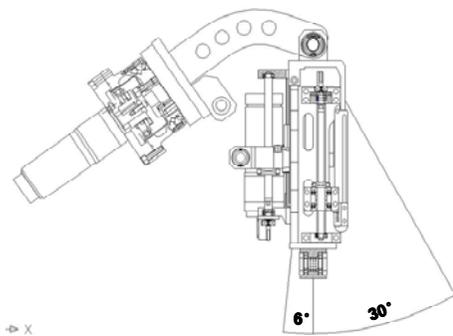


Fig. 2.10 Rotation range of the shoulder pitch joint



Fig. 2.11 Shoulder joint

팔꿈치관절은 Fig. 2.14 와 같은 구조이며, 어깨의 두 번째 관절(pitch)축으로 Fig.2.13 과 같이 몸체의 앞쪽으로 70°의 운동범위를 갖는다.

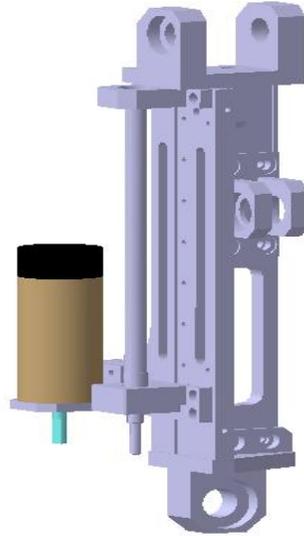


Fig. 2.12 3D model of the elbow joint

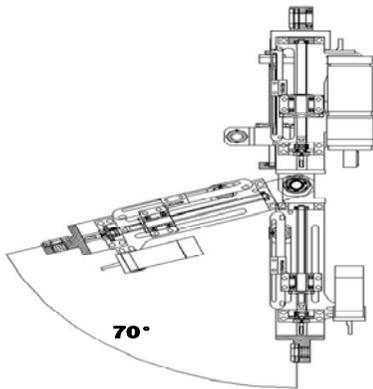


Fig. 2.13 Rotation range of the elbow pitch joint



Fig. 2.14 Elbow joint

손목부분은 Fig. 2.17 과 같이 손목의 균형(roll)축과 말단장치인 그리퍼의 1축 이렇게 2개의 관절로 구성된다. 균형(roll)축은 180°의 운동범위를 가지며, 팔꿈치의 세 번째 관절(pitch)축으로 Fig. 2.16 과 같이 안쪽 35°의 범위에서 운동이 이루어진다.

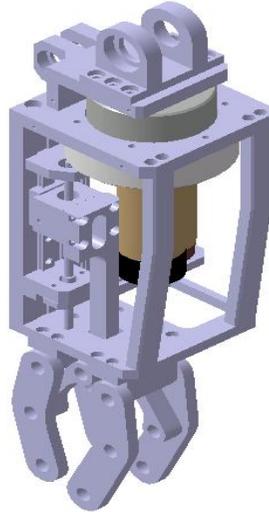


Fig. 2.15 3D model of the wrist joint

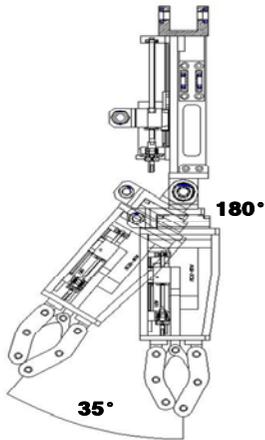


Fig. 2.16 Rotation range of the wrist pitch and yaw joint



Fig. 2.17 Wrist joint

Table 2.5 는 양팔에 사용된 관절 구동기의 사양을 나타낸다.

Table 2.5 Specification of the joint actuator for arm part

Axis	Type of actuator	Motion	Motor power [W]	Pulley ratio	Ratio of speed reducer	Ball screw lead[mm]
0	Directly connected	yaw	60	-	1 : 160	-
1	4 bar-link	pitch	150	1 : 1	1 : 4.3	2
2	4 bar-link	pitch	60	1 : 4.8	-	1
3	4 bar-link	pitch	60	1 : 1.75	-	1
4	Directly connected	yaw	60	-	1 : 100	-
5	4 bar-link	gripper	18	1 : 1.75	-	1

2.5 이족보행로봇 하체 기구부 구성

골반 관절은 보행 시 로봇의 무게 중심이동과 방향전환에 영향을 미치는 중요한 관절이다. 골반관절은 Fig. 2.19 와 같이 양쪽 다리의 회전(yaw)운동, 균형(roll)운동으로 4자유도로 구성되며 회전(yaw)운동은 로봇의 회전역할을 하고, 균형(roll)운동은 보행 시 로봇의 균형역할을 한다.

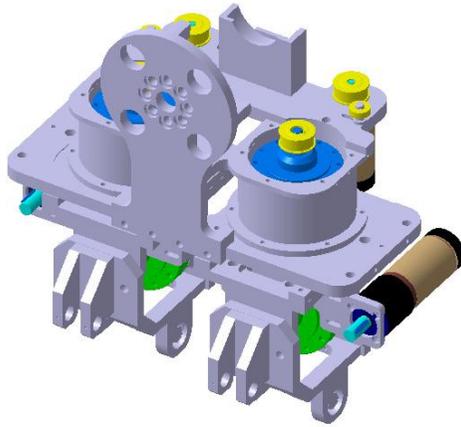


Fig. 2.18 3D model of the pelvis joint

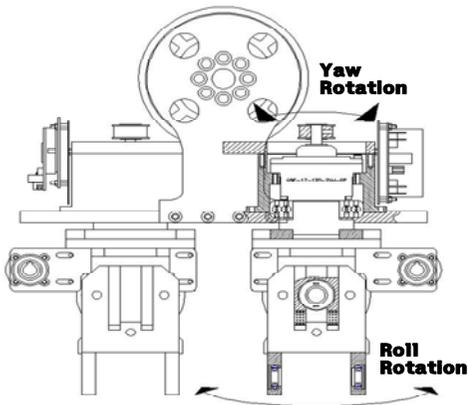


Fig. 2.19 Rotation range of the pelvis yaw and roll joint

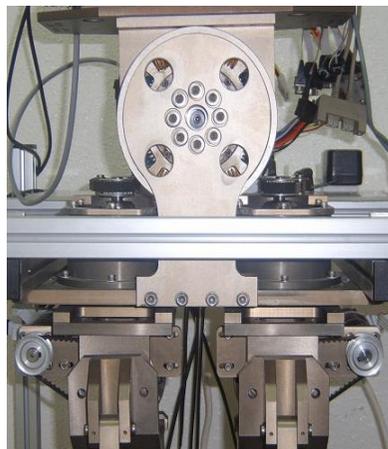


Fig. 2.20 Pelvis joint

이족보행로봇의 다리구조는 허벅지관절, 무릎관절 그리고 발목관절로 이루어져 있다. 허벅지관절은 2축 구동기로 Fig. 2.23 와 같다. 다음은 3D 모델과 앞으로 30°, 뒤로 20°의 운동범위를 나타내고 있다.

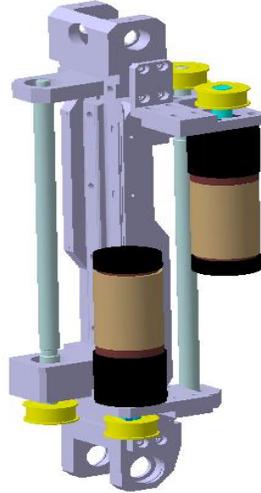


Fig. 2.21 3D model of the thigh joint

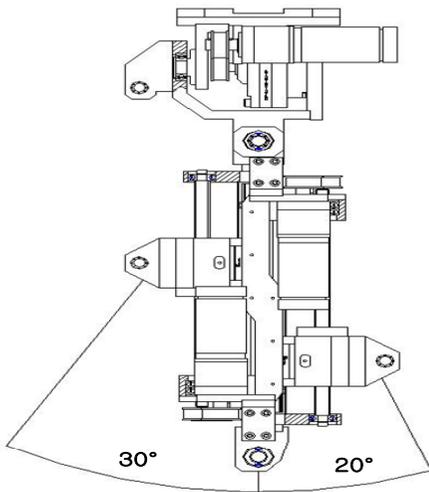


Fig. 2.22 Rotation range of the thigh pitch joint



Fig. 2.23 Thigh joint

무릎관절은 Fig. 2.26 와 같고, 다음은 3D 모델과 뒤로 55°의 운동범위를 나타내고 있다.



Fig. 2.24 3D model of the knee joint

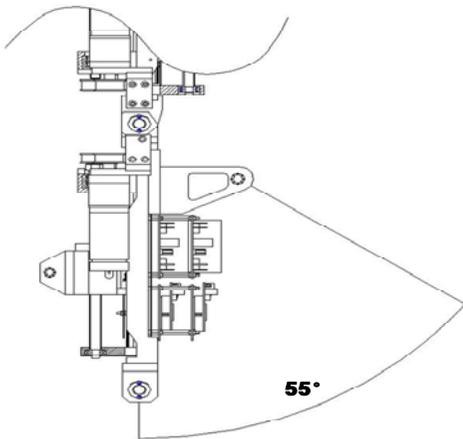


Fig. 2.25 Rotation range of the knee pitch joint

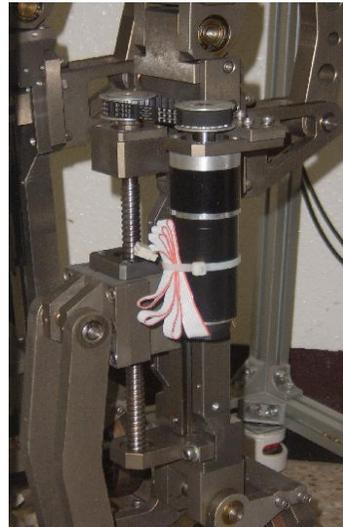


Fig. 2.26 Knee joint

발목관절은 Fig. 2.29 와 같고, 균형(roll)운동으로 로봇보행 시 로봇 전체균형을 담당하는 역할을 한다. 다음은 3D 모델과 앞뒤 30° 및 좌우 회전 운동범위를 나타내고 있다.

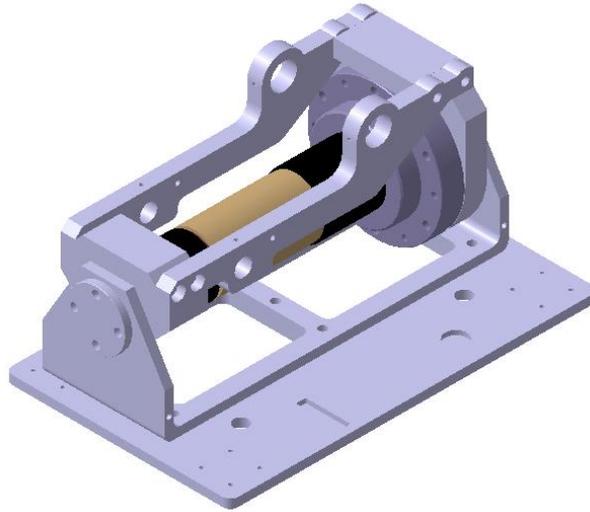


Fig. 2.27 3D model of the ankle joint

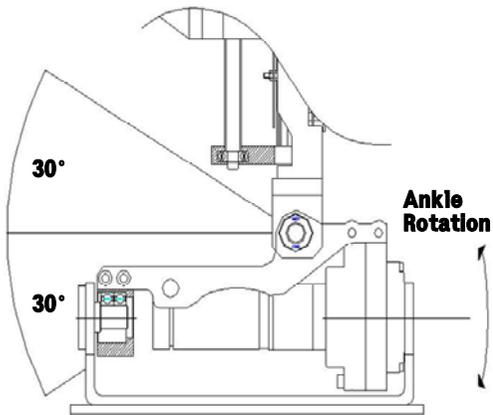


Fig. 2.28 Rotation range of the ankle pitch and roll joint



Fig. 2.29 Ankle joint

Table 2.6 은 하체에 사용된 관절 구동기의 사양을 나타낸다.

Table 2.6 Specification of the joint actuator for leg part

Axis	Type of actuator	Motion	Motor power [W]	Pulley ratio	Ratio of speed reducer	Ball screw lead[mm]
0	Directly connected	yaw	150	1 : 1	1 : 120	-
1	Directly connected	roll	150	1 : 2.44	1 : 430	-
2	4 bar-link	pitch	150	1 : 1	1 : 4.3	4
3	4 bar-link	pitch	150	1 : 1	1 : 15	4
4	4 bar-link	pitch	150	1 : 1	1 : 15	4
5	Directly connected	roll	150	-	1:645	-

2.6 이족보행로봇 제어시스템 구성

개발된 로봇은 27개의 관절과 모터를 가지고 있다. 아래 Fig. 2.32 는 이전 로봇의 제어 시스템으로 향후에 장착 할 로봇의 전체 제어시스템을 나타내고 있다. KUBIR-3 에는 상업용 로봇 제어기가 아닌 자체 개발된 제어 시스템을 사용하여 2개의 모터는 Fig. 2.30 인 하나의 컨트롤러(controller)와 Fig. 2.31 인 드라이버로 구성된 관절제어기로 제어되고, 여러 개의 관절제어기는 CAN(Controller Area Network)으로 연결되어 있다. 관절제어기의 상위에는 로봇의 주제어기인 임베디드용 소형 컴퓨터가 있어 각 관절의 구성조건에 따른 연산을 하고, 관절제어기로 제어명령을 내리게 된다. 이로써 이족보행로봇의 전체 관절이 제어되어 로봇 움직임을 만들 수 있게 된다.

개발에 사용된 컴퓨터에는 무선 랜카드가 장착되어 있어 외부에서 로봇으로 명령을 내릴 수 있다. 반대로 관절 각 및 에러 등과 같은 로봇의 현재상태를 외부로 알릴 수도 있다. 또한 로봇의 머리 부분에 설치된 2대의 CCD 카메라로부터 들어오는 아날로그 영상신호를 획득하여 이진화하기 위해 주제어기에는 이미지 그래버가 설치되어 있으며 로봇은 영상처리를 통해 입력된 영상에서 특정 물체를 검출하여 관절제어에 적용할 수 있도록 되어 있다.

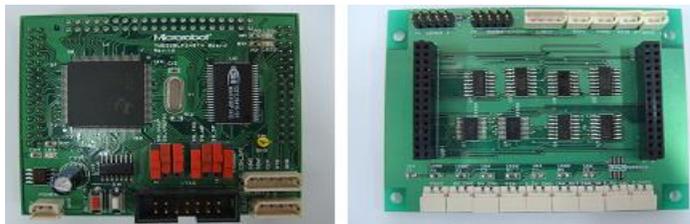


Fig. 2.30 Motor Controller



Fig. 2.31 Motor Driver

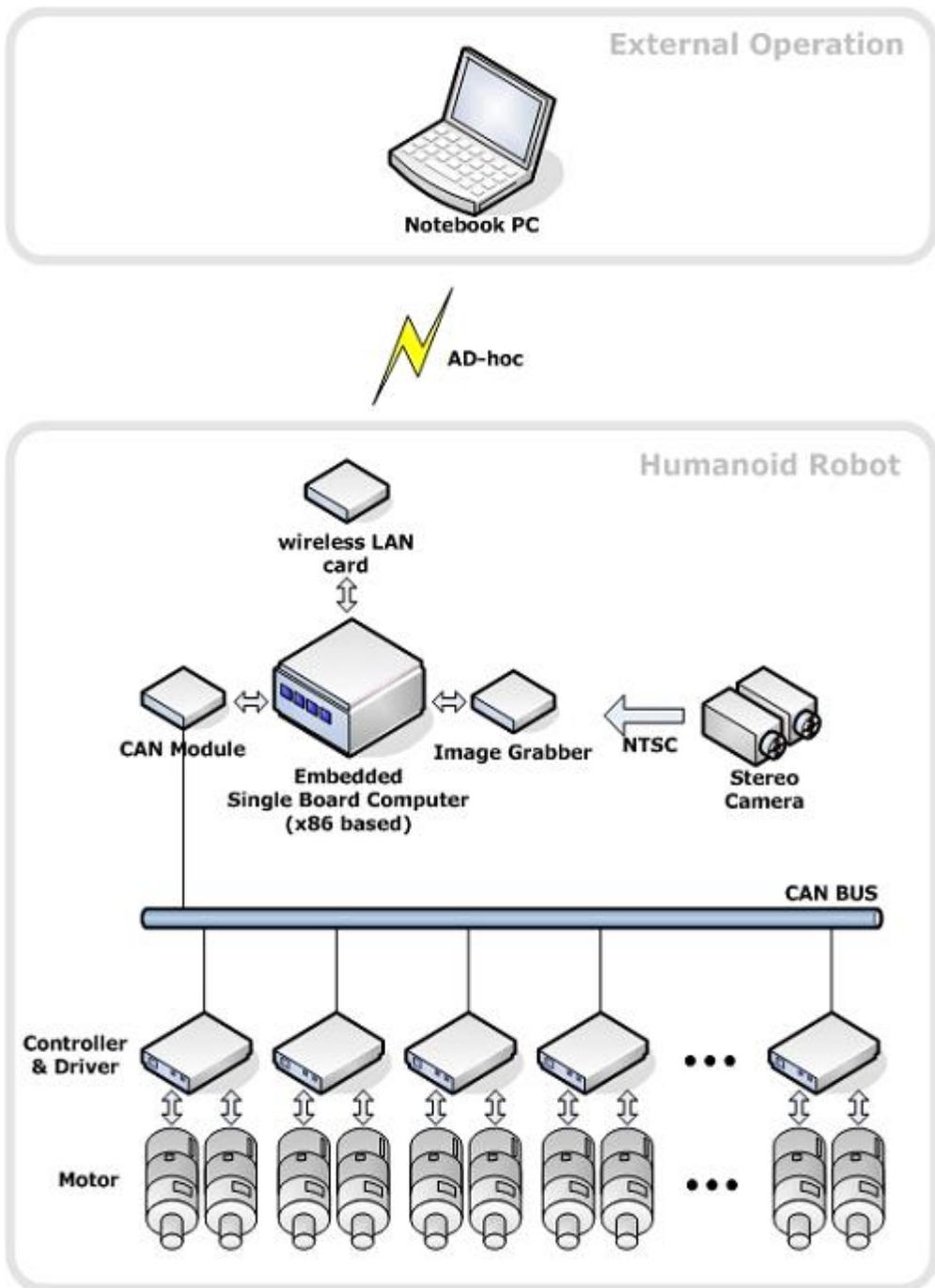


Fig. 2.32 Total control system of the KUBIR-3

제 3 장 이족보행로봇의 기구학 해석

로봇의 안정된 보행을 위해서는 로봇 하체의 관절에 대해 기구학(kinematics) 해석이 필요하다. 본 논문에서는 로봇의 보행과 카메라로 사물을 인식하여 팔로 사물을 잡는 동작이 주안점이다. 그래서 로봇 전체시스템에 대하여 기구학적 해석을 하였다. 로봇의 허리 중심부를 모든 로봇관절의 기준점으로 머리의 카메라를 2축, 다리를 6축 그리고 팔을 6축으로 매니퓰레이터(manipulator)로 적용하였고, 다시 다리 기구학 해석에서 기준 좌표계와 말단장치(end effector)의 관계인 동차 변환을 역으로 기구학을 해석하여 로봇 전체시스템의 기구학적 호환이 가능하게 해석하였다.

3.1 이족보행로봇 D-H 구성

로봇의 기구학을 해석하기 위해서는 각 링크의 좌표계를 체계적으로 선택할 수 있어야 한다. 그래서 기구학에서 사용하는 동차 변환(Homogeneous Transform)을 이용하면 간편하다. 로봇의 각 관절에 각도가 주어 졌을 때 말단장치의 위치와 방향을 결정하기 위한 이족보행로봇의 순 기구학 방정식은 보편적으로 많이 사용하는 좌표계 선정 방법이 Denavit-Hartenberg (D-H) 규약이다.

좌표계 설정 시 D-H 규약은 다음과 같다.

(D-H 1) x_1 축은 z_0 축과 수직이다.

(D-H 2) x_1 축은 z_1 축과 수직이다.

D-H 규약은 4개의 기본 변환 행렬의 곱으로 각 관절의 동차 변환 행렬 A_i 로 표현한다.

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

$$= \begin{bmatrix} C\theta_i & -S\theta_i & 0 & 0 \\ S\theta_i & C\theta_i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a_i \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & C\alpha_i & -S\alpha_i & 0 \\ 0 & S\alpha_i & C\alpha_i & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} C\theta_i & -S\theta_i \cdot C\alpha_i & S\theta_i \cdot S\alpha_i & a_i \cdot C\theta_i \\ S\theta_i & C\theta_i \cdot C\alpha_i & -C\theta_i \cdot S\alpha_i & a_i \cdot S\theta_i \\ 0 & S\alpha_i & C\alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.1.1)$$

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.

아래 Fig. 3.1 은 KUBIR-3 로봇 전체 D-H 좌표계이다. 설정된 매개변수는 머리, 팔, 다리로 나누면 Table 3.1~3.3 과 같다.

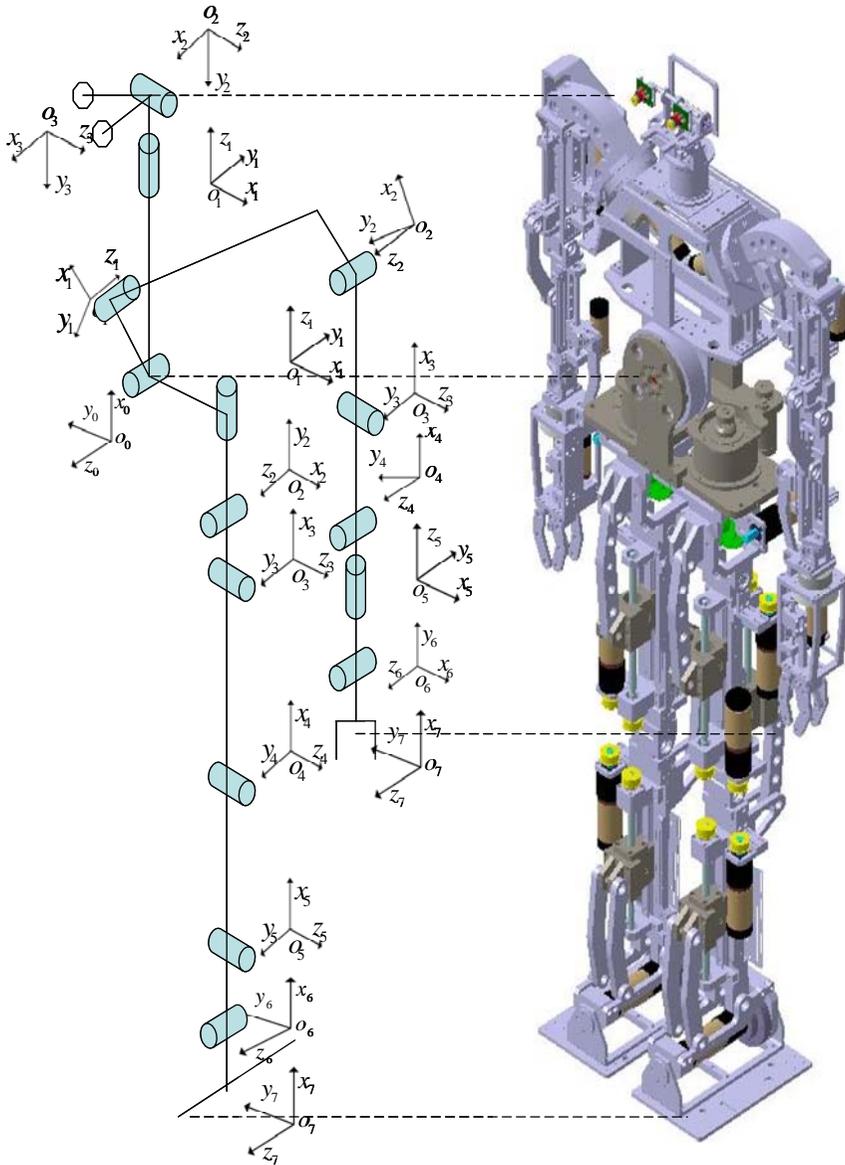


Fig. 3.1 D-H coordinates for the KUBIR-3

Table 3.1 Link parameter for the KUBIR-3 head

link	a_i	α_i	d_i	θ_i
1	0	90°	0	θ_1
2	0	-90°	d_2	θ_2
3	a_3	0	0	θ_3

Table 3.2 Link parameter for the KUBIR-3 arm

link	a_i	α_i	d_i	θ_i
1	a_1	90°	0	θ_1
2	0	-90°	d_2	θ_2
3	a_3	90°	0	θ_3
4	a_4	-90°	0	θ_4
5	0	90°	0	θ_5
6	0	-90°	d_6	θ_6
7	a_7	0	0	θ_7

Table 3.3 Link parameter for the KUBIR-3 leg

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

3.2 이족보행로봇 머리 기구학 해석

로봇 머리 부분의 D-H 좌표계를 자세히 나타내면 Fig. 3.2 와 같다.

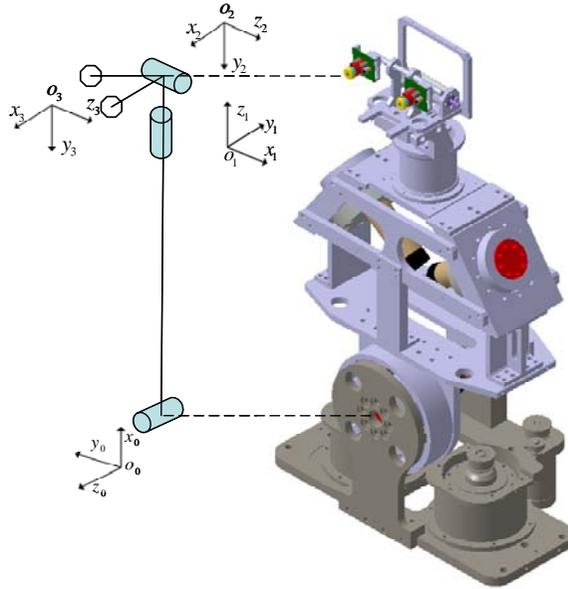


Fig. 3.2 D-H coordinates for the head

A 행렬들은 식 (3.1.1) 과 Table 3.1 의 매개변수들로부터 다음과 같이 얻어진다.

$$A_1 = \begin{bmatrix} C\theta_1 & 0 & S\theta_1 & 0 \\ S\theta_1 & 0 & -C\theta_1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned}
A_2 &= \begin{bmatrix} C\theta_2 & 0 & -S\theta_2 & 0 \\ S\theta_2 & 0 & C\theta_2 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & d_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
A_3 &= \begin{bmatrix} C\theta_3 & -S\theta_3 & 0 & a_3C\theta_3 \\ S\theta_3 & C\theta_3 & 0 & a_3S\theta_3 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{3.2.1}
\end{aligned}$$

따라서 변환행렬 T 는 다음과 같이 주어진다.

$$T_{0,head}^3 = A_1 A_2 A_3 = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & P_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & P_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & P_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{3.2.2}$$

$$r_{11} = c\theta_1 c\theta_2 c\theta_3 - s\theta_1 s\theta_3$$

$$r_{12} = -c\theta_1 c\theta_2 s\theta_3 - s\theta_1 c\theta_3$$

$$r_{13} = -c\theta_1 s\theta_2$$

$$P_x = c\theta_1 c\theta_2 a_3 c\theta_3 - s\theta_1 a_3 s\theta_3 + s\theta_1 d_2$$

$$r_{21} = s\theta_1 c\theta_2 c\theta_3 + c\theta_1 s\theta_3$$

$$r_{22} = -s\theta_1 c\theta_2 s\theta_3 + c\theta_1 c\theta_3$$

$$r_{23} = -s\theta_1 s\theta_2$$

$$P_y = s\theta_1 c\theta_2 a_3 c\theta_3 + c\theta_1 a_3 s\theta_3 - c\theta_1 d_2$$

$$r_{31} = s\theta_2 c\theta_3$$

$$r_{32} = -s\theta_2 s\theta_3$$

$$r_{33} = c\theta_2$$

$$P_z = s\theta_2 a_3 c\theta_3$$

그러므로 로봇 머리의 말단 위치벡터 P_{head} 는 다음과 같다.

$$P_{head} = \begin{bmatrix} P_x \\ P_y \\ P_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c\theta_1 c\theta_2 a_3 c\theta_3 - s\theta_1 a_3 s\theta_3 + s\theta_1 d_2 \\ s\theta_1 c\theta_2 a_3 c\theta_3 + c\theta_1 a_3 s\theta_3 - c\theta_1 d_2 \\ s\theta_2 a_3 c\theta_3 \end{bmatrix} \quad (3.2.3)$$

3.3 이족보행로봇 팔 기구학 해석

로봇 팔 부분의 D-H 좌표계를 자세히 나타내면 Fig. 3.3 와 같다.

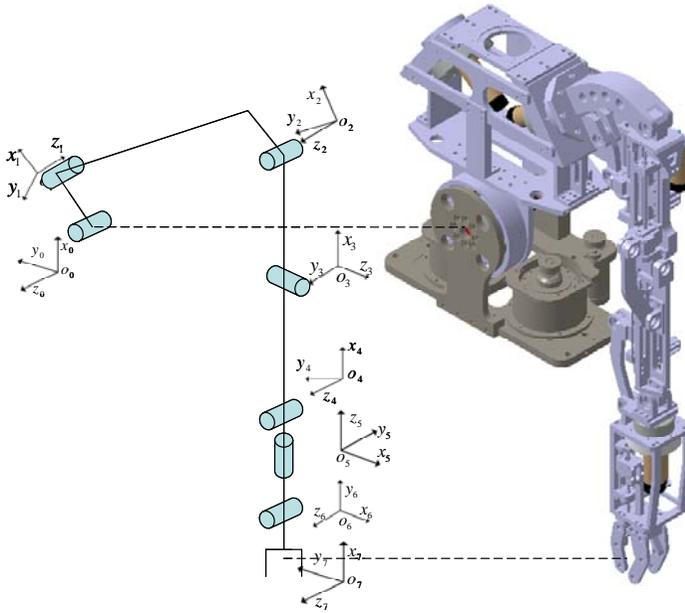


Fig. 3.3 D-H coordinates for the arm

A 행렬들은 식 (3.1.1) 과 Table 3.2 의 매개변수들로부터 다음과 같이 얻어진다.

$$A_1 = \begin{bmatrix} C\theta_1 & 0 & S\theta_1 & a_1 C\theta_1 \\ S\theta_1 & 0 & -C\theta_1 & a_1 S\theta_1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad A_2 = \begin{bmatrix} C\theta_2 & 0 & -S\theta_2 & 0 \\ S\theta_2 & 0 & C\theta_2 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & d_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A_3 = \begin{bmatrix} C\theta_3 & 0 & S\theta_3 & a_3 C\theta_3 \\ S\theta_3 & 0 & -C\theta_3 & a_3 S\theta_3 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad A_5 = \begin{bmatrix} C\theta_5 & 0 & S\theta_5 & 0 \\ S\theta_5 & 0 & -C\theta_5 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A_4 = \begin{bmatrix} C\theta_4 & 0 & -S\theta_1 & a_4 C\theta_4 \\ S\theta_4 & 0 & C\theta_1 & a_4 S\theta_4 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad A_6 = \begin{bmatrix} C\theta_6 & 0 & -S\theta_6 & 0 \\ S\theta_6 & 0 & C\theta_6 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & d_6 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A_7 = \begin{bmatrix} C\theta_7 & -S\theta_7 & 0 & a_7 C\theta_7 \\ S\theta_7 & C\theta_7 & 0 & a_7 S\theta_7 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.3.1)$$

따라서 변환행렬 T 는 다음과 같이 주어진다.

$$T_{0,arm}^7 = A_1 A_2 A_3 A_4 A_5 A_6 A_7 = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & P_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & P_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & P_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.3.2)$$

$$r_{31} = (((s\theta_2 c\theta_3 c\theta_4 + c\theta_2 s\theta_4)c\theta_5 - s\theta_2 s\theta_3 s\theta_5)c\theta_6 + (-s\theta_2 c\theta_3 s\theta_4 + c\theta_2 c\theta_4)s\theta_6)c\theta_7 + (-s\theta_2 c\theta_3 c\theta_4 + c\theta_2 s\theta_4)s\theta_5 - s\theta_2 s\theta_3 c\theta_5)s\theta_7$$

$$r_{32} = -(((s\theta_2 c\theta_3 c\theta_4 + c\theta_2 s\theta_4)c\theta_5 - s\theta_2 s\theta_3 s\theta_5)c\theta_6 + (-s\theta_2 c\theta_3 s\theta_4 + c\theta_2 c\theta_4)s\theta_6)s\theta_7 + (-s\theta_2 c\theta_3 c\theta_4 + c\theta_2 s\theta_4)s\theta_5 - s\theta_2 s\theta_3 c\theta_5)c\theta_7$$

$$r_{33} = -((s\theta_2 c\theta_3 c\theta_4 + c\theta_2 s\theta_4)c\theta_5 - s\theta_2 s\theta_3 s\theta_5)s\theta_6 + (-s\theta_2 c\theta_3 s\theta_4 + c\theta_2 c\theta_4)c\theta_6$$

$$P_x = [\{ \{ (c\theta_1 c\theta_2 c\theta_3 - s\theta_1 s\theta_3)c\theta_4 - c\theta_1 s\theta_2 s\theta_4 \} c\theta_5 + (-c\theta_1 c\theta_2 s\theta_3 - s\theta_1 c\theta_3)s\theta_5 \} c\theta_6 + \{ -(c\theta_1 c\theta_2 c\theta_3 - s\theta_1 s\theta_3)s\theta_4 - c\theta_1 s\theta_2 c\theta_4 \} s\theta_6] a_7 c\theta_7 + [-\{ (c\theta_1 c\theta_2 c\theta_3 - s\theta_1 s\theta_3)c\theta_4 - c\theta_1 s\theta_2 s\theta_4 \} s\theta_5 + (-c\theta_1 c\theta_2 s\theta_3 - s\theta_1 c\theta_3)c\theta_5] a_7 c\theta_7 + [\{ (c\theta_1 c\theta_2 c\theta_3 - s\theta_1 s\theta_3)c\theta_4 - c\theta_1 s\theta_2 s\theta_4 \} s\theta_5 - (-c\theta_1 c\theta_2 s\theta_3 - s\theta_1 c\theta_3)c\theta_5] d_6 + (c\theta_1 c\theta_2 c\theta_3 - s\theta_1 s\theta_3)a_4 c\theta_4 - c\theta_1 s\theta_2 a_4 s\theta_4 - s\theta_1 a_3 c\theta_3 + s\theta_1 d_2 + a_1 c\theta_1$$

$$P_y = [\{ \{ (s\theta_1 c\theta_2 c\theta_3 + c\theta_1 s\theta_3)c\theta_4 - s\theta_1 s\theta_2 s\theta_4 \} c\theta_5 + (-s\theta_1 c\theta_2 s\theta_3 + c\theta_1 c\theta_3)s\theta_5 \} c\theta_6 + \{ -(s\theta_1 c\theta_2 c\theta_3 + c\theta_1 s\theta_3)s\theta_4 - s\theta_1 s\theta_2 c\theta_4 \} s\theta_6] a_7 c\theta_7 + [-\{ (s\theta_1 c\theta_2 c\theta_3 + c\theta_1 s\theta_3)c\theta_4 - s\theta_1 s\theta_2 s\theta_4 \} s\theta_5 + (-s\theta_1 c\theta_2 s\theta_3 + c\theta_1 c\theta_3)c\theta_5] a_7 c\theta_7 + [\{ (s\theta_1 c\theta_2 c\theta_3 + c\theta_1 s\theta_3)c\theta_4 - s\theta_1 s\theta_2 s\theta_4 \} s\theta_5 - (-s\theta_1 c\theta_2 s\theta_3 + c\theta_1 c\theta_3)c\theta_5] d_6 + (s\theta_1 c\theta_2 c\theta_3 + c\theta_1 s\theta_3)a_4 c\theta_4 - s\theta_1 s\theta_2 a_4 s\theta_4 + c\theta_1 a_3 c\theta_3 - c\theta_1 d_2 + a_1 s\theta_1$$

$$\begin{aligned}
P_z = & [\{(s\theta_2 c\theta_3 c\theta_4 + c\theta_2 s\theta_4)c\theta_5 - s\theta_2 s\theta_3 s\theta_5\}c\theta_6 + (-s\theta_2 c\theta_3 s\theta_4 \\
& + c\theta_2 c\theta_4)s\theta_6]a_7 c\theta_7 + \{-(s\theta_2 c\theta_3 c\theta_4 + c\theta_2 s\theta_4)s\theta_5 - s\theta_2 s\theta_3 c\theta_5\} \\
& a_7 c\theta_7 + \{(s\theta_2 c\theta_3 c\theta_4 + c\theta_2 s\theta_4)s\theta_5 + s\theta_2 s\theta_3 c\theta_5\}d_6 + s\theta_2 c\theta_3 a_4 c\theta_4 \\
& + c\theta_2 a_4 s\theta_4
\end{aligned}$$

그러므로 로봇 팔의 말단 위치벡터 P_{arm} 는 다음과 같다.

$$P_{arm} = \begin{bmatrix} P_x \\ P_y \\ P_z \end{bmatrix} \tag{3.3.3}$$

3.4 이족보행로봇 다리 기구학 해석

로봇 다리 부분의 D-H 좌표계를 자세히 나타내면 Fig. 3.4 와 같다.

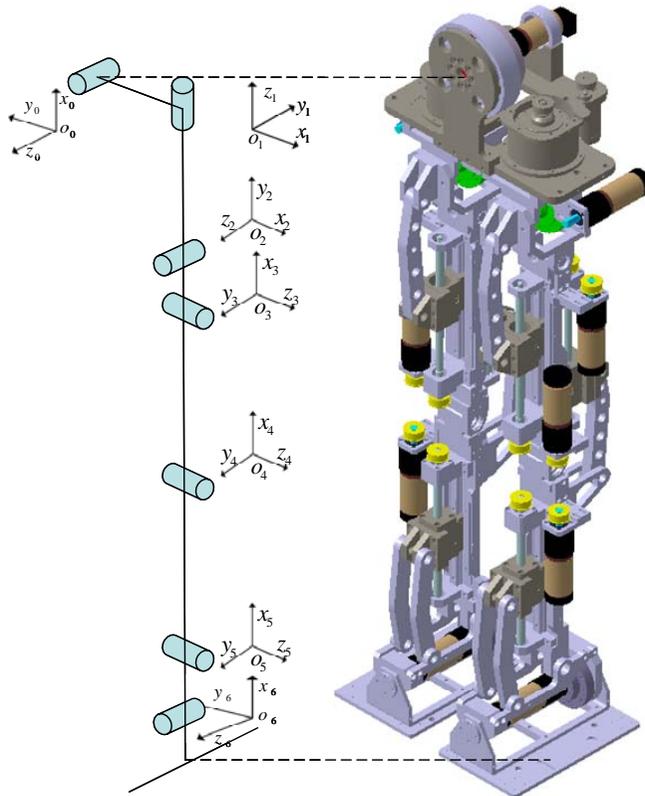


Fig. 3.4 D-H coordinate for the leg

A 행렬들은 식 (3.1.1) 과 Table 3.3 의 매개변수들로부터 다음과 같이 얻어진다.

$$A_1 = \begin{bmatrix} C\theta_1 & 0 & S\theta_1 & a_1C\theta_1 \\ S\theta_1 & 0 & -C\theta_1 & a_1S\theta_1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad A_2 = \begin{bmatrix} C\theta_2 & 0 & -S\theta_2 & 0 \\ S\theta_2 & 0 & C\theta_2 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & d_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$r_{33} = -((s\theta_2 c\theta_3 c\theta_4 + c\theta_2 s\theta_4)c\theta_5 + (-s\theta_2 c\theta_3 s\theta_4 + c\theta_2 c\theta_4)s\theta_5)s\theta_6 + (-s\theta_2 c\theta_3 c\theta_4 + c\theta_2 s\theta_4)s\theta_5 + (-s\theta_2 c\theta_3 s\theta_4 + c\theta_2 c\theta_4)c\theta_5)c\theta_6$$

$$p_x = [\{ \{ (c\theta_1 c\theta_2 c\theta_3 - s\theta_1 s\theta_3)c\theta_4 - c\theta_1 s\theta_2 s\theta_4 \} c\theta_5 + \{ -(c\theta_1 c\theta_2 c\theta_3 - s\theta_1 s\theta_3)s\theta_4 - c\theta_1 s\theta_2 c\theta_4 \} s\theta_5 \} c\theta_6 + \{ - \{ (c\theta_1 c\theta_2 c\theta_3 - s\theta_1 s\theta_3)c\theta_4 - c\theta_1 s\theta_2 s\theta_4 \} s\theta_5 + \{ -(c\theta_1 c\theta_2 c\theta_3 - s\theta_1 s\theta_3)s\theta_4 - c\theta_1 s\theta_2 c\theta_4 \} c\theta_5 \} s\theta_6] a_7 c\theta_7 + (-c\theta_1 c\theta_2 s\theta_3 - s\theta_1 c\theta_3) a_7 s\theta_7 + [\{ (c\theta_1 c\theta_2 c\theta_3 - s\theta_1 s\theta_3)c\theta_4 - c\theta_1 s\theta_2 s\theta_4 \} c\theta_5 + \{ -(c\theta_1 c\theta_2 c\theta_3 - s\theta_1 s\theta_3)s\theta_4 - c\theta_1 s\theta_2 c\theta_4 \} s\theta_5] a_6 c\theta_6 + [- \{ (c\theta_1 c\theta_2 c\theta_3 - s\theta_1 s\theta_3)c\theta_4 - c\theta_1 s\theta_2 s\theta_4 \} s\theta_5 + \{ -(c\theta_1 c\theta_2 c\theta_3 - s\theta_1 s\theta_3)s\theta_4 - c\theta_1 s\theta_2 c\theta_4 \} c\theta_5] a_6 s\theta_6 + \{ (c\theta_1 c\theta_2 c\theta_3 - s\theta_1 s\theta_3)c\theta_4 - c\theta_1 s\theta_2 s\theta_4 \} a_5 c\theta_5 + \{ -(c\theta_1 c\theta_2 c\theta_3 - s\theta_1 s\theta_3)s\theta_4 - c\theta_1 s\theta_2 c\theta_4 \} a_5 s\theta_5 + (c\theta_1 c\theta_2 c\theta_3 - s\theta_1 s\theta_3) a_4 c\theta_4 - c\theta_1 s\theta_2 a_4 s\theta_4 + c\theta_1 c\theta_2 a_3 c\theta_3 - s\theta_1 a_3 s\theta_3 + s\theta_1 d_2 + a_1 c\theta_1$$

$$P_y = [\{ \{ (s\theta_1 c\theta_2 c\theta_3 + c\theta_1 s\theta_3)c\theta_4 - s\theta_1 s\theta_2 s\theta_4 \} c\theta_5 + \{ -(s\theta_1 c\theta_2 c\theta_3 + c\theta_1 s\theta_3)s\theta_4 - s\theta_1 s\theta_2 c\theta_4 \} s\theta_5 \} c\theta_6 + \{ - \{ (s\theta_1 c\theta_2 c\theta_3 + c\theta_1 s\theta_3)c\theta_4 - s\theta_1 s\theta_2 s\theta_4 \} s\theta_5 + \{ -(s\theta_1 c\theta_2 c\theta_3 + c\theta_1 s\theta_3)s\theta_4 - s\theta_1 s\theta_2 c\theta_4 \} c\theta_5 \} s\theta_6] a_7 c\theta_7 + (-s\theta_1 c\theta_2 s\theta_3 + c\theta_1 c\theta_3) a_7 s\theta_7 + [\{ (s\theta_1 c\theta_2 c\theta_3 + c\theta_1 s\theta_3)c\theta_4 - s\theta_1 s\theta_2 s\theta_4 \} c\theta_5 + \{ -(s\theta_1 c\theta_2 c\theta_3 + c\theta_1 s\theta_3)s\theta_4 - s\theta_1 s\theta_2 c\theta_4 \} s\theta_5] a_6 c\theta_6 + [- \{ (s\theta_1 c\theta_2 c\theta_3 + c\theta_1 s\theta_3)c\theta_4 - s\theta_1 s\theta_2 s\theta_4 \} s\theta_5 + \{ -(s\theta_1 c\theta_2 c\theta_3 + c\theta_1 s\theta_3)s\theta_4 - s\theta_1 s\theta_2 c\theta_4 \} c\theta_5] a_6 s\theta_6 + \{ (s\theta_1 c\theta_2 c\theta_3 + c\theta_1 s\theta_3)c\theta_4 - s\theta_1 s\theta_2 s\theta_4 \} a_5 c\theta_5 + \{ -(s\theta_1 c\theta_2 c\theta_3 + c\theta_1 s\theta_3)s\theta_4 - s\theta_1 s\theta_2 c\theta_4 \} a_5 s\theta_5 + \{ s\theta_1 c\theta_2 c\theta_3 + c\theta_1 s\theta_3 \} a_4 c\theta_4 - s\theta_1 s\theta_2 a_4 s\theta_4 + s\theta_1 c\theta_2 a_3 c\theta_3 + c\theta_1 a_3 s\theta_3 - c\theta_1 d_2 + a_1 s\theta_1$$

$$\begin{aligned}
P_z = & [\{ (s\theta_2 c\theta_3 c\theta_4 + c\theta_2 s\theta_4) c\theta_5 + (-s\theta_2 c\theta_3 s\theta_4 + c\theta_2 c\theta_4) \\
& s\theta_5 \} c\theta_6 + \{ -(s\theta_2 c\theta_3 c\theta_4 + c\theta_2 s\theta_4) s\theta_5 + (-s\theta_2 c\theta_3 s\theta_4 + \\
& c\theta_2 c\theta_4) c\theta_5 \} s\theta_6] a_7 c\theta_7 - s\theta_2 s\theta_3 a_7 s\theta_7 + \{ (s\theta_2 c\theta_3 c\theta_4 + \\
& c\theta_2 s\theta_4) c\theta_5 + (-s\theta_2 c\theta_3 s\theta_4 + c\theta_2 c\theta_4) s\theta_5 \} a_6 c\theta_6 + \{ -(s\theta_2 \\
& c\theta_3 c\theta_4 + c\theta_2 s\theta_4) s\theta_5 + (-s\theta_2 c\theta_3 s\theta_4 + c\theta_2 c\theta_4) c\theta_5 \} a_6 s\theta_6 \\
& + (s\theta_2 c\theta_3 c\theta_4 + c\theta_2 s\theta_4) a_5 c\theta_5 + (-s\theta_2 c\theta_3 s\theta_4 + c\theta_2 c\theta_4) a_5 \\
& s\theta_5 + s\theta_2 c\theta_3 a_4 c\theta_4 + c\theta_2 a_4 s\theta_4 + s\theta_2 a_3 c\theta_3
\end{aligned}$$

그러므로 로봇 다리의 말단 위치벡터 P_{leg} 는 다음과 같다.

$$P_{leg} = \begin{bmatrix} P_x \\ P_y \\ P_z \end{bmatrix} \quad (3.4.3)$$

3.5 이족보행로봇의 기구학적 상호관계 적용

식 (3.4.2) 의 관계에서 로봇 몸 중앙에 있는 기준 좌표계와 로봇 발바닥의 말단 좌표계의 순서를 바꾸어 역으로 설정하게 되면, 발 끝에서부터 머리의 카메라 끝의 말단 장치의 연결과 팔의 말단장치까지 연결이 가능하게 된다.

우선 로봇 발의 D-H 좌표계 표시법을 수정하게 되면 식 (3.5.1) 과 같이 된다.

$$T_{7,leg}^0 = A_7 A_6 A_5 A_4 A_3 A_2 A_1 \quad (3.5.1)$$

로봇 발바닥부터 머리의 말단장치는 식 (3.5.1) 과 식(3.2.2) 의 관계로 정의한다.

$$T_{7,leg}^0 T_{0,head}^3 \quad (3.5.2)$$

로봇 발바닥부터 팔의 말단장치는 식 (3.5.1) 과 식(3.3.2) 의 관계로 정의한다.

$$T_{7,leg}^0 T_{0,arm}^7 \quad (3.5.3)$$

제 4 장 이족보행로봇의 관절 구동기 해석

이 장에서는 4절 링크가 적용된 이족보행로봇의 팔과 하체에 대해 관절 구동기 해석을 하였다. 로봇 팔 그리퍼에 하중을 적용한 경우와 로봇 상체의 중량을 받는 하체 부분에 관절(pitch)운동을 하는 4절 링크에 구조해석을 하였다. 이족보행로봇을 구성하는 어깨관절, 팔꿈치관절, 손목관절, 허벅지관절, 무릎관절, 발목관절의 각 부하토크를 계산하여 로봇의 작동에 필요한 부하토크를 지지할 수 있는 모터의 용량 설계를 하였다.

4.1 4절 링크의 관절 관계식

이족보행로봇의 관절에 적용한 4절 링크 구조는 4절에서 3절의 길이는 고정의 회전 축으로 구성되고, 나머지 한 절은 볼 나사의 직선 이동 축으로 구성되어 있다. 이러한 4절 링크의 관절각과 볼 나사의 직선운동 거리와의 기하학적 관계는 Fig. 4.1 과 같이 표현된다.

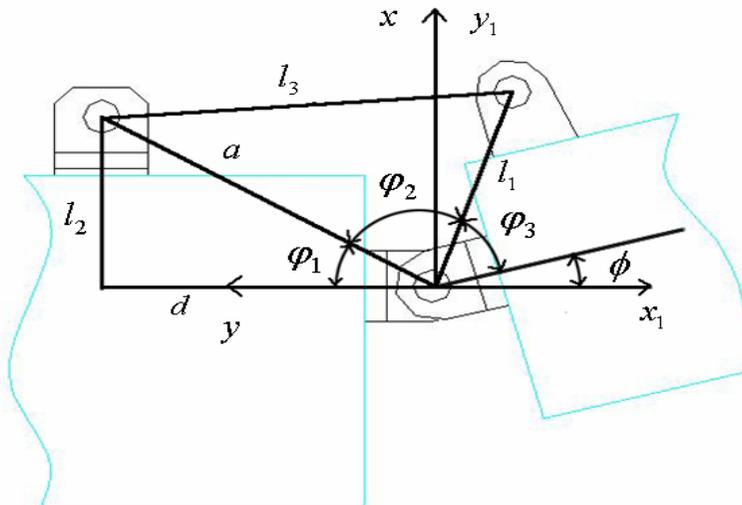


Fig. 4.1 Four-bar link structure

볼 나사의 변형량 d 와 관절각 ϕ 의 관계는 다음과 같다. 관절각의 관계는 식 (4.1.1)로 나타내고, 값의 부호에 따라 방향이 다르게 나타난다.

$$\phi = 180^\circ - (\varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3) \quad (4.1.1)$$

우선 Fig. 4.1 에서 φ_3, d, l_2, l_1 는 설계로 정해지는 값이다. 이 정해진 값들로 a 는 식 (4.1.2)으로 구할 수 있다.

$$a = \sqrt{l_2^2 + d^2} \quad (4.1.2)$$

이고 φ_1 는 식 (4.1.3)으로 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\varphi_1 = \tan^{-1} \frac{l_2}{d} \quad (4.1.3)$$

cosine 법칙을 이용하여 φ_2 을 구할 수 있다.

$$a^2 + l_1^2 - 2l_1a \cos \varphi_2 = l_3^2 \quad (4.1.4)$$

$$\varphi_2 = -\cos^{-1} \frac{l_3^2 - (a^2 + l_1^2)}{2l_1a} \quad (4.1.5)$$

이들 관계식을 이용하여 4절 링크에 연결된 다른 회전관절의 관절각을 제어하면서 구동이 가능하게 된다.

Table 4.1 은 각 4절 링크의 변형량 d 를 제외한 나머지 링크길이 l_1, l_2, l_3 을 나타낸 것이다.

Table 4.1 Length of the link

Part of the joint	l_1 [mm]	l_2 [mm]	l_3 [mm]
Shoulder	116.55	57.87	77.0
Elbow	66.78	145.47	53.5
Wrist	59.71	131.17	66.0
Thigh	112.9	200.5	95.0
Knee	124.04	182.5	101
Ankle	96.1	186.52	92

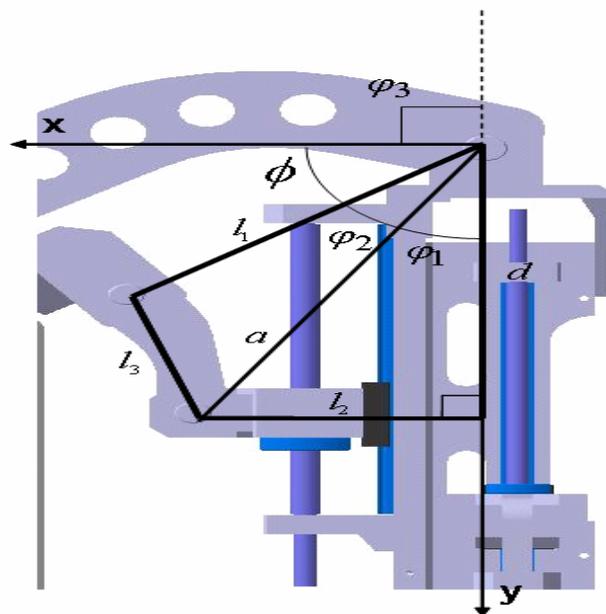


Fig. 4.2 Four-bar link modeling for the shoulder joint

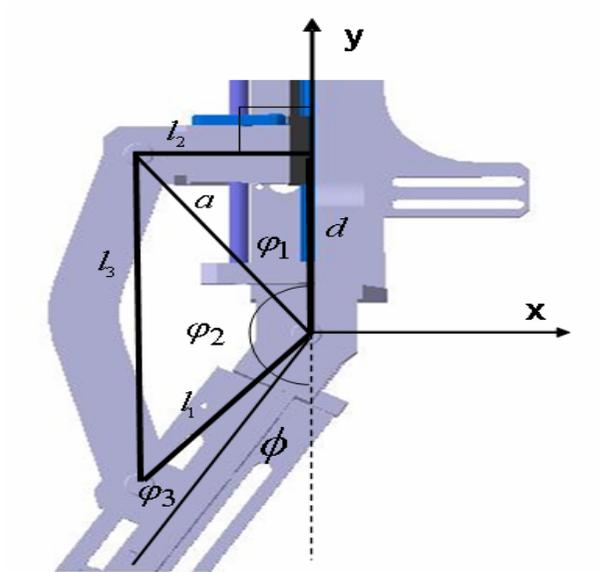


Fig. 4.3 Four-bar link modeling for the elbow joint

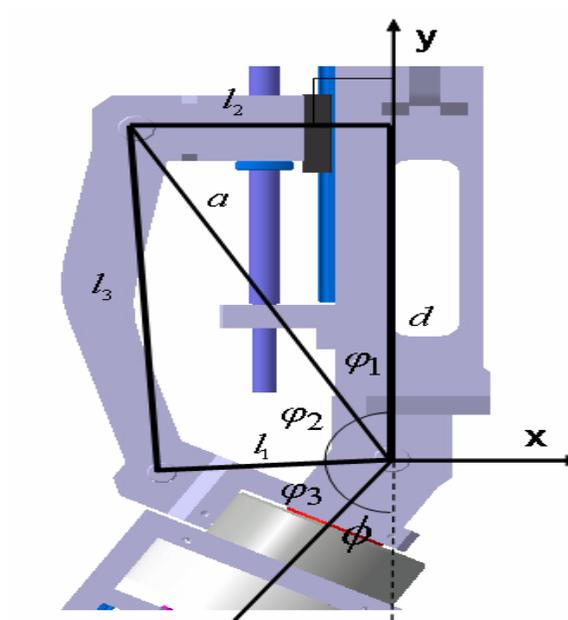


Fig. 4.4 Four-bar link modeling for the wrist joint

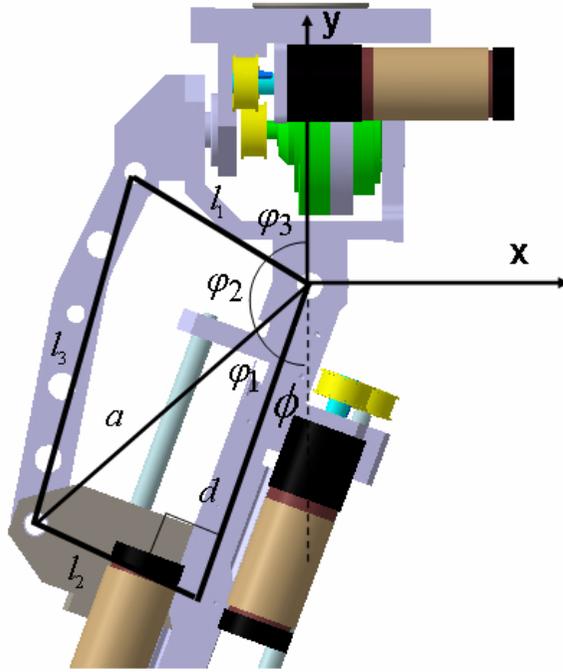


Fig. 4.5 Four-bar link modeling for the thigh joint

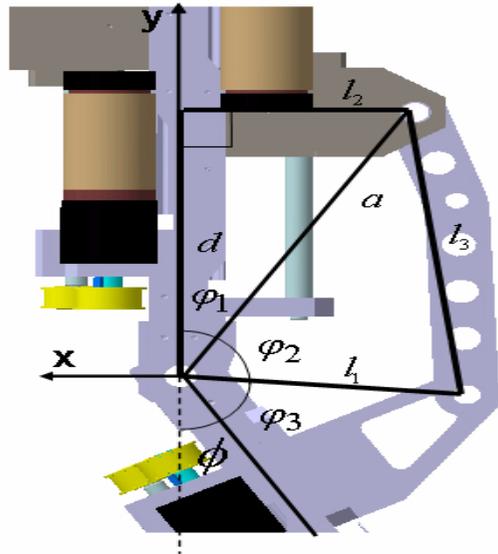


Fig. 4.6 Four-bar link modeling for the knee joint

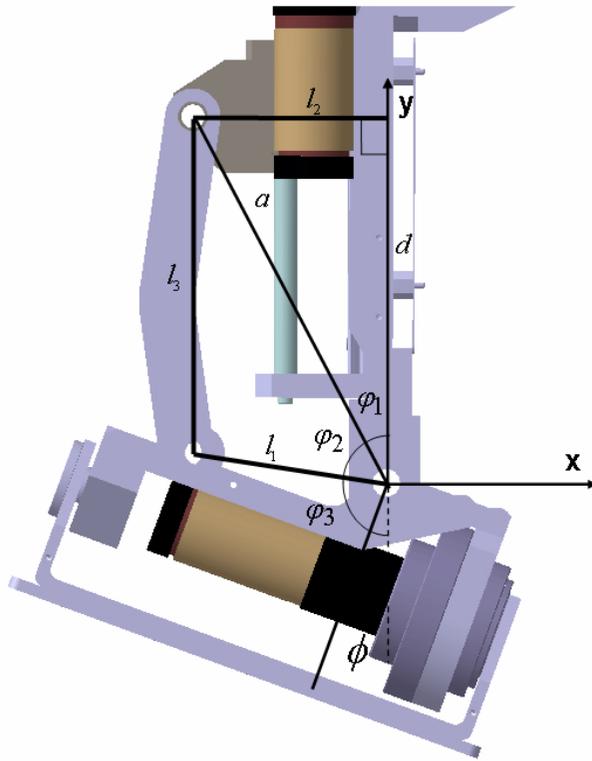


Fig. 4.7 Four-bar link modeling for the ankle joint

4.2 4절 링크 구조의 관절 구동기 부하토크 해석

4절 링크 구조 관절에 적용된 모터선택의 적합성은 관절 구동기 부하 토크 방정식으로 계산할 수 있다. 로봇의 자중과 외부 하중 합에 대한 4절 링크 모멘트 발생 힘은 식(4.2.7)에 대입하여 모터의 부하토크를 구한다. 이 구해진 값들은 다시 적용된 모터의 출력과 비교하여 타당성을 검증할 수 있다. 각 관절 구동기의 부하토크 방정식을 유도하기 위해 Fig. 4.8~13 과 같이 도식화한다. 그리고 모멘트 발생 힘은 볼 나사와 일직선상 같은 방향으로 힘을 이동 시킨다.

어깨 관절의 부하토크 해석은 Fig. 4.8 과 같이 도식화 된다. 이 부분은 중력방향에 대해 좌우로 움직인다. 그래서 중력에 대한 하중은 기구부가 지지하기에 어깨 관절 모터는 링크에 의해 몸 쪽으로 당기거나 미는 힘에 대해 유지만하면 된다. 즉, 관절 구동시에만 힘이 작용하기에 어깨 이하 중량 M_1 모멘트를 발생한다.

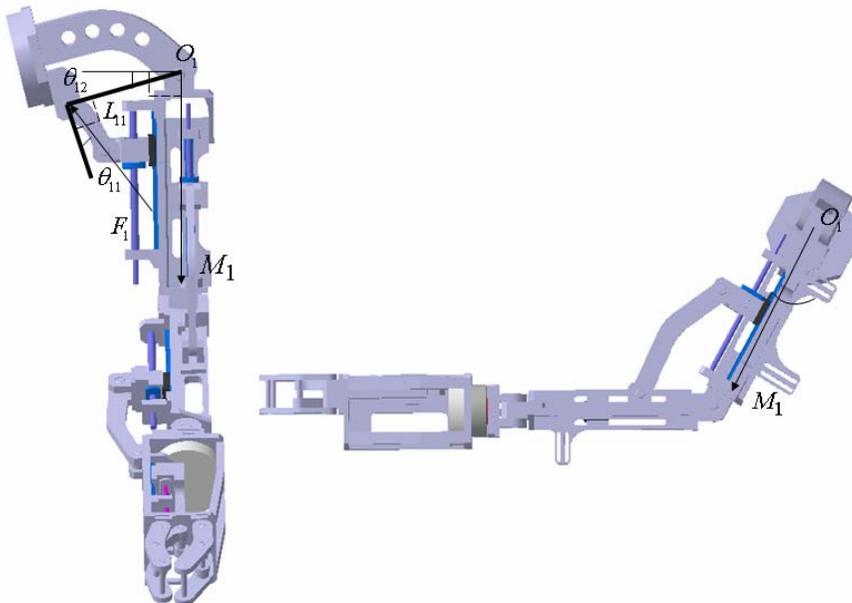


Fig. 4.8 Torque analysis of the shoulder joint

팔꿈치 관절의 부하토크 해석은 Fig. 4.9 와 같고, M_2 가 모멘트 발생 힘이 된다.

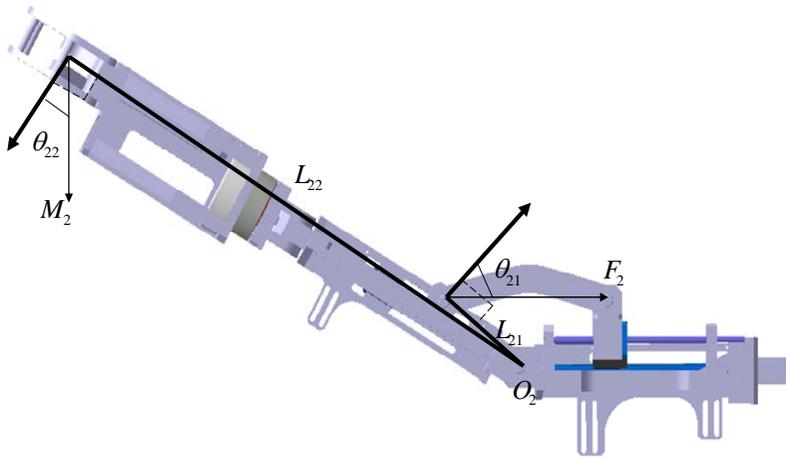


Fig. 4.9 Torque analysis of the elbow joint

손목 관절도 어깨 관절과 같은 구조로 부하토크 해석은 Fig. 4.10 과 같다. 이 부분은 중력방향에 대해 수직이고, 관절 구동 시에만 힘이 작용하기에 손목 관절 이하 중량 M_3 이 모멘트 발생 힘이 된다.

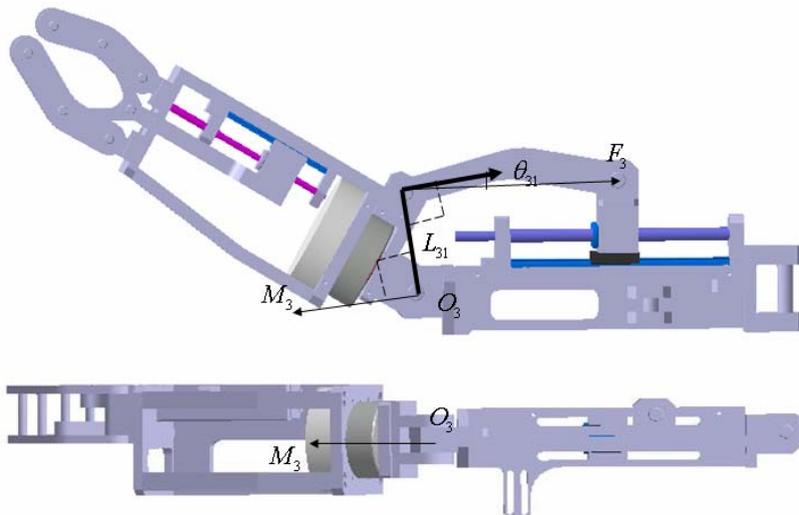


Fig. 4.10 Torque analysis of the wrist joint

다리 관절들은 상체에서 작용하는 자중과 외력의 합에 대해 부하토크 해석을 하였다. 허벅지 관절의 부하토크 해석은 Fig. 4.11 과 같다. 그래서 M_4 가 허벅지 관절 모멘트 발생 힘이 된다.

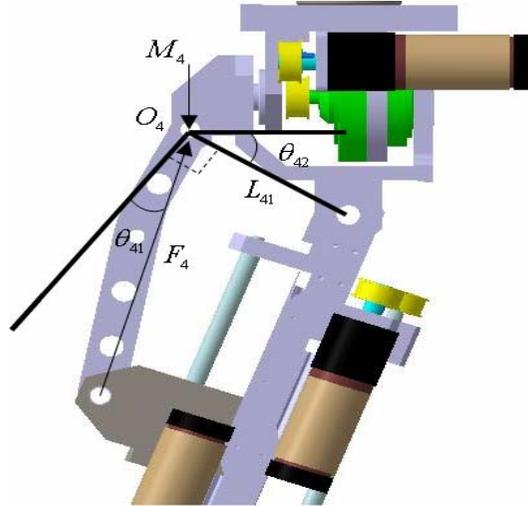


Fig. 4.11 Torque analysis of the thigh joint

무릎 관절의 부하토크 해석은 Fig. 4.12 과 같다. 그래서 M_5 가 무릎 관절 모멘트를 발생시키는 힘이 된다.

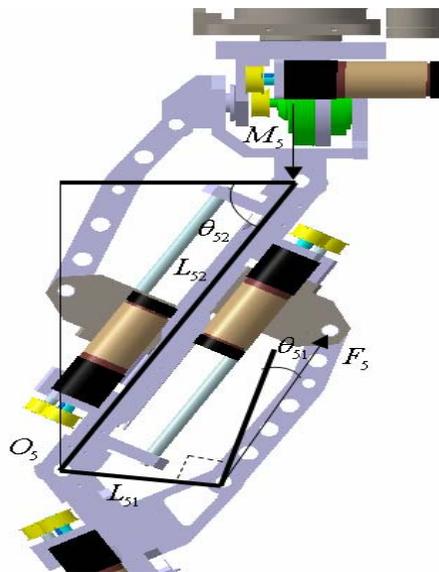


Fig. 4.12 Torque analysis of the knee joint

발목 관절의 부하토크 해석은 Fig. 4.13 과 같다. 그래서 M_6 이 발목 관절 모멘트 발생 힘이 된다.

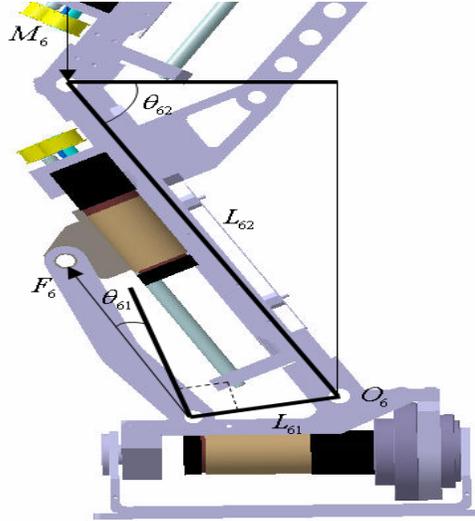


Fig. 4.13 Torque analysis of the ankle joint

로봇 구동 시 4절 링크의 볼 나사의 길이와 θ_{i1} 가 변하게 되므로 볼 나사 축 방향의 외력 F_i 의 크기가 변하게 된다. 회전중심 O_i 에 대한 모멘트 합 원리에서 외력에 대한 토크 발생 힘을 각 관절부의 관계식을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$F_1 = \frac{M_1 L_{11} \cos \theta_{12}}{L_{11} \cos \theta_{11}} \quad (4.2.1)$$

$$F_2 = \frac{M_2 L_{22} \cos \theta_{22}}{L_{21} \cos \theta_{21}} \quad (4.2.2)$$

$$F_3 = \frac{M_3 L_{31}}{L_{31} \cos \theta_{31}} \quad (4.2.3)$$

$$F_4 = \frac{M_4 L_{41} \cos \theta_{42}}{L_{41} \cos \theta_{41}} \quad (4.2.4)$$

$$F_5 = \frac{M_5 L_{52} \cos \theta_{52}}{L_{51} \cos \theta_{51}} \quad (4.2.5)$$

$$F_6 = \frac{M_6 L_{62} \cos \theta_{62}}{L_{61} \cos \theta_{61}} \quad (4.2.6)$$

여기서, M_i 는 로봇에 대한 외부 하중과 로봇의 자중의 합이다. M_1 은 16.2kgf, M_2 는 13.3kgf, M_3 는 11.9kgf, M_4 는 59.4kgf, M_5 는 65.8kgf, M_6 는 69.6kgf 이다. 식 (4.2.7)은 각 관절부에 작용하는 부하 하중에 대한 모터 토크를 계산식이다.

$$\tau_{i(Motorload)} = \frac{F_i \cdot l_b}{2\pi \cdot \eta \cdot A} \quad (4.2.7)$$

위 식에서 l_b 는 볼 나사의 리드, η 은 볼 나사의 효율, A 는 보완된 모터의 감속비이며, 각 관절의 사양을 Table 4.2 에 나타내었다.

Table 4.2 Constants of the load torque in each joint

Body name	Lead of ballscrew l_b [mm]	Efficiency of ballscrew η [%]	Reduction	Motor Max. continuous torque
Shoulder	2 mm	90%	1 : 4.3	181 Nmm
Elbow	1 mm	90%	1 : 4.8	94.8 Nmm
Wrist	1 mm	90%	1 : 1.75	94.8 Nmm
Thigh	4 mm	90%	1 : 4.3	181 Nmm
Knee	4 mm	90%	1 : 15	181 Nmm
Ankle	4 mm	90%	1 : 15	181 Nmm

4.3 4절 링크 구조의 관절 구동기 해석 데이터

로봇이 구동할 때마다 구동기에 작용하는 부하토크를 식 (4.2.7)을 적용하여 계산하여 얻은 시뮬레이션 결과를 Fig. 4.14~4.19 에 나타내었다.

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

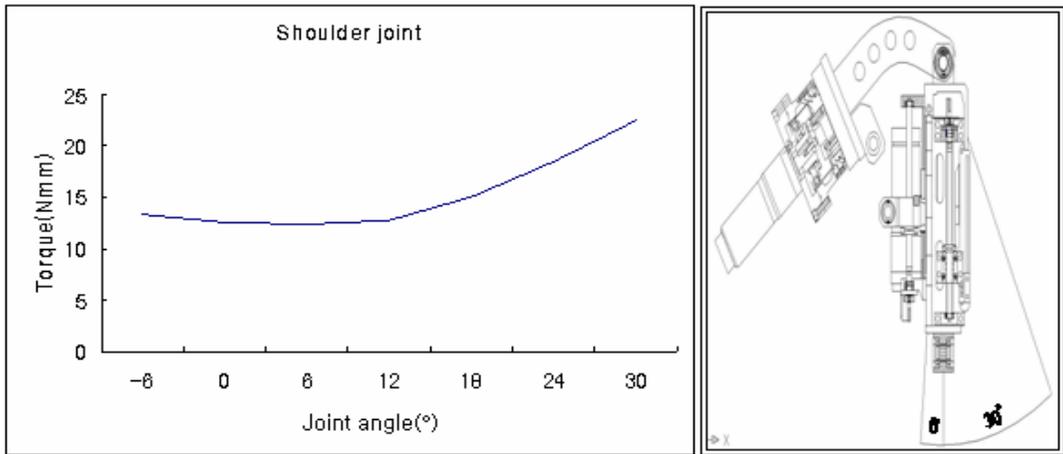


Fig. 4.14 Torque analysis of the shoulder joint

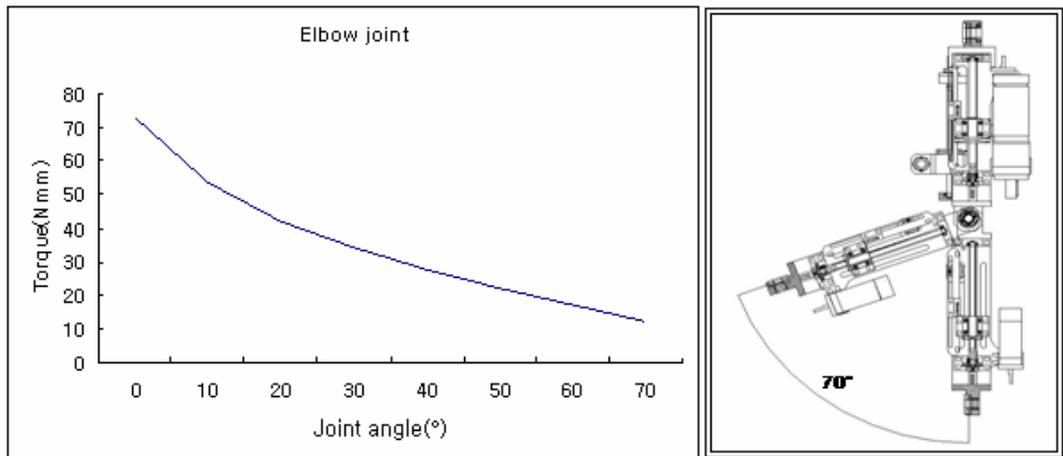


Fig. 4.15 Torque analysis of the elbow joint

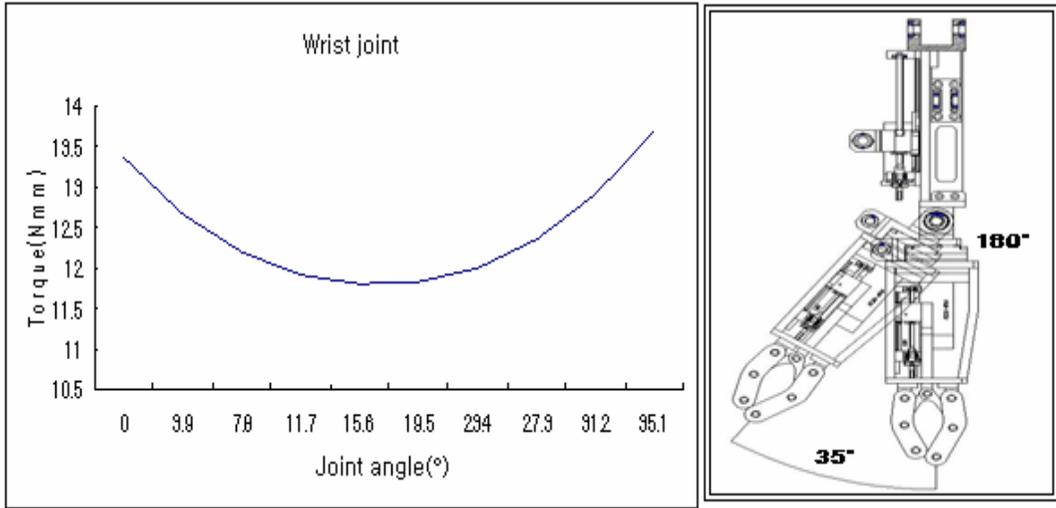


Fig. 4.16 Torque analysis of the wrist joint

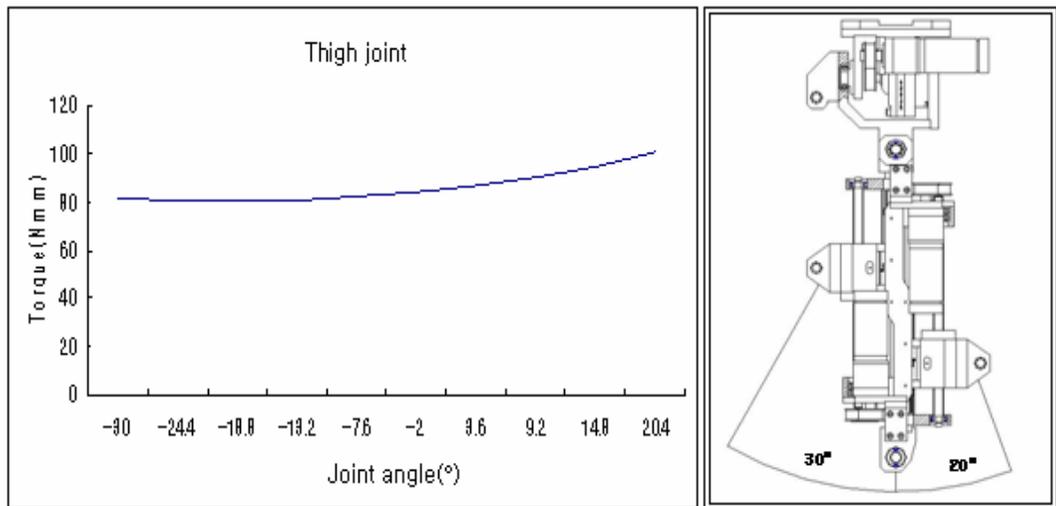


Fig. 4.17 Torque analysis of the thigh joint

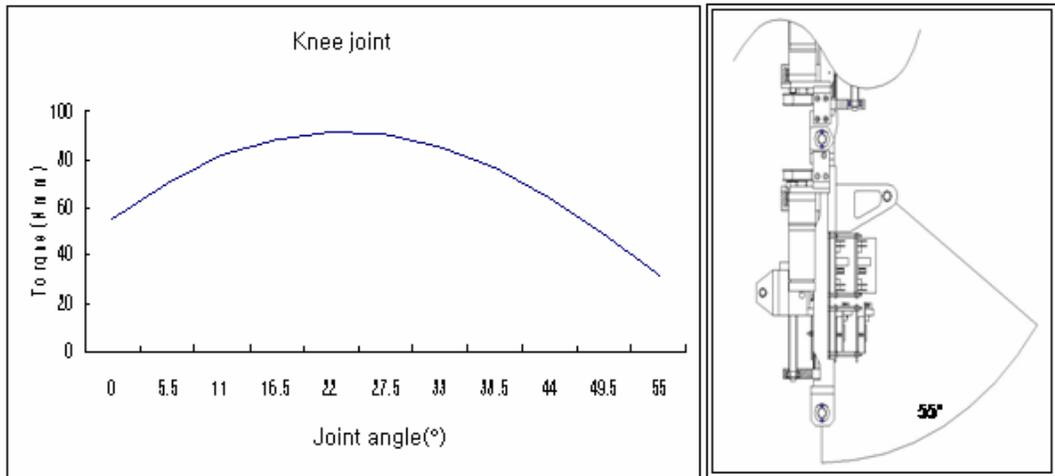


Fig. 4.18 Torque analysis of the knee joint

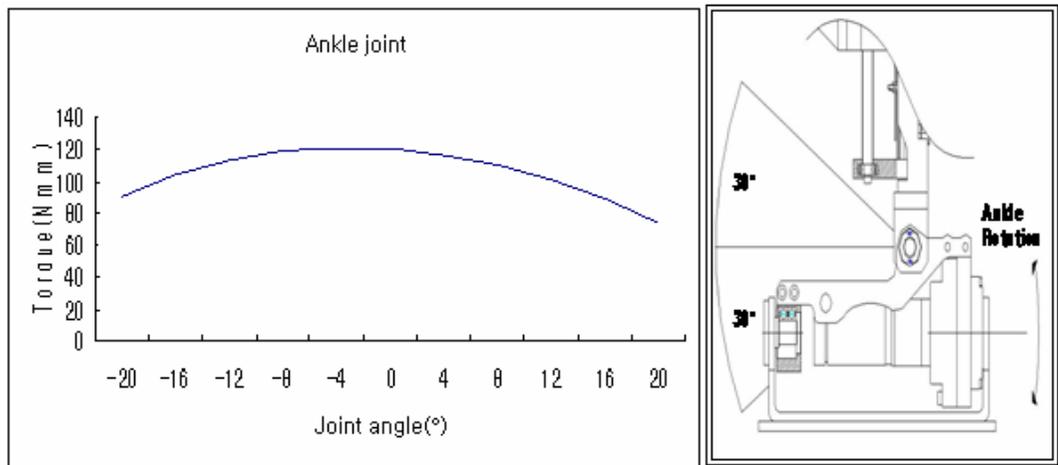


Fig. 4.19 Torque analysis of the ankle joint

각 관절의 변형량 각이 변함으로써, Fig. 4.7~4.12 에서 나타난 바와 같이 관절에 필요한 토크의 크기가 변화 한다는 것을 알 수 있다. 또한 관절에 필요한 토크의 크기가 항상 모터의 정격토크 이하에 있으므로 선정된 모터의 안전성을 확인 할 수 있다.

제 5 장 이족보행로봇의 기구부 구조해석

이 장에서는 이족보행로봇의 경량화로 인한 기구부 및 링크의 변형을 해석하기 위하여 CATIA 3D 응용해석 프로그램을 사용해 핵심적인 로봇 프레임의 모델링을 행하여 응력상태를 해석하였다. 로봇 팔은 그리퍼의 중앙에 가해지는 외부 하중 100N에 대한 변형량과 응력분포를 중점으로 다리에 가해지는 상체의 모든 하중에 대한 변형량과 응력분포를 유한요소 해석함으로써 실제 로봇 구동 시 보행에 미치는 변수를 사전에 파악할 수 있다.

5.1 유한요소 모델

유한요소 모델에서 로봇의 기구부 부분은 SOLID 요소를 사용하였으며, 부품재질에 따라 각각의 특성을 다르게 적용하다. 로봇 부품들의 연결은 모든 부품을 조립하여 각각 표현화하기에는 너무 복잡하였다. 따라서 동일 경계에서 생성된 동일 위치의 노드 (node)들은 하나의 노드로 단순화하여 단일부품으로 모델링 해석하였다. 아래 Fig. 5.1~5.2 은 로봇 팔과 다리의 응력 및 변형량해석을 위한 유한요소 모델이다.

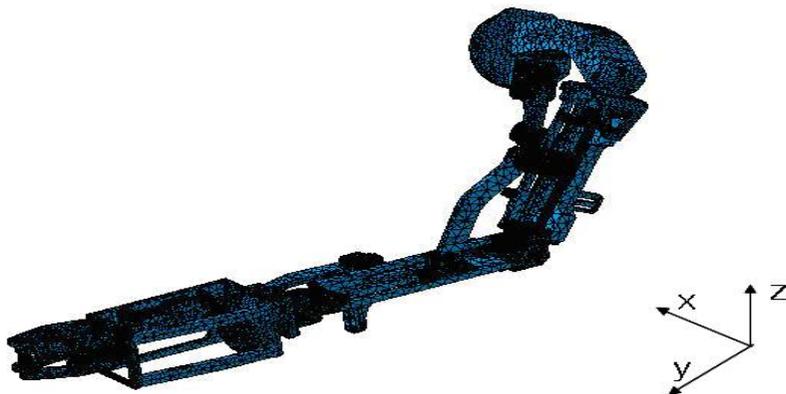


Fig. 5.1 Finite element model of the arm product

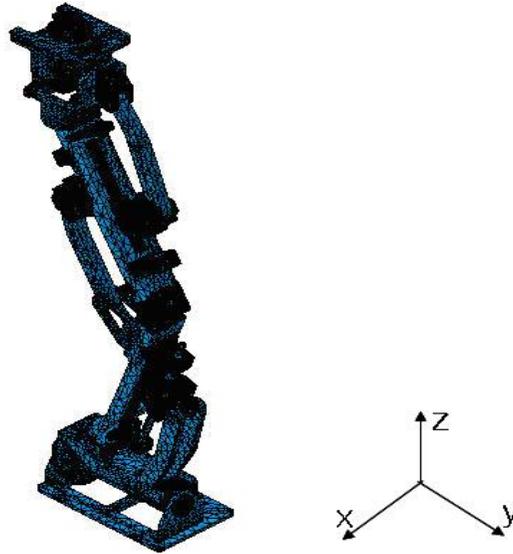


Fig. 5.2 Finite element model of the leg product

로봇의 기구부 및 구성부품의 재질은 알루미늄(Aluminum), 스테인레스(Stainless steel), 탄소강(Carbon steel)을 사용하였다. 로봇 관절과 링크를 결합하는 핀에는 스테인레스를 볼 나사, 감속기, LM블록과 가이드는 탄소강을 그리고 나머지 프레임에는 알루미늄 재질 특성을 적용시켰다. 재료에 적용한 물성치는 Table 5.1과 같으며, 모델 요소 개수 및 절점수는 Table 5.2에 나타내었다.

Table 5.1 Material property

	Young Modulus(<i>GPa</i>)	Poisson's Ratio	Density (<i>kg / m³</i>)	Yield Strength(<i>MPa</i>)
Aluminum	70	0.346	2710	95
Stainless steel	200	0.266	7860	250
Carbon steel	200	0.291	7200	310

Table 5.2 Element type and number

	Number of elements	Number of nodes
Arm Product	297084	77178
Leg Product	355023	89388

5.2 유한요소 해석

5.2.1 이족보행로봇 팔의 유한요소 해석

로봇 팔은 어깨의 팔과 손목의 회전을 제외한 모든 관절이 4절 링크 구조로 되어 있다. 각 로봇 중요 지지 프레임들은 각 부위별로 구조 해석을 실행하여 조립상태인 로봇 팔은 100N의 부하에 견딜 수 있게 설계하였다. CATIA 프로그램에서 각 프레임에 재질을 부여하면 재질의 특성에 따른 자중이 부여된다. 그래서 로봇 팔의 자중은 일정하게 작용한다. 최종적인 로봇 팔 전체의 구조해석을 위해 로봇 팔과 몸 연결 부위를 고정으로 정하고, 그리퍼 중앙 부분에 100N의 가상 물체가 있다는 가정에서 시뮬레이션을 실행하였다. 여기서 자중과 최대 외력 100N에 대한 응력의 결과해석은 Fig. 5.4 이고, 변형량의 결과해석은 Fig. 5.5 이다.

Table 5.3 Displacement and stress of the KUBIR-3 arm

Load(N)	Stress(MPa)	Displacement(mm)
0	8.78	0.308
10	15.1	0.537
20	21.5	0.767
30	27.8	0.996
40	34.2	1.23
50	40.5	1.46
60	46.8	1.68
70	53.2	1.91
80	59.5	2.14
90	65.9	2.37
100	72.2	2.6

Table 5.3 은 처음 자중부터 최대 외부하중 100N까지 10단계를 차례대로 테스트한 로봇 팔의 응력과 변형량의 결과이다. 이 결과처럼 로봇 팔에 발생한 응력은 Table 5.1 에서 모든 재질의 항복응력 범위 안에 들어있고, 최대 변형량도 최소한으로 작용하여 안전한 설계라고 정의 할 수 있다. 기존 산업용 로봇의 변형량이 0.05~0.1인 것에 비해 매우 높다는 것을 알 수 있다. 아래 Fig. 5.3 에서 초기 0.3(mm)의 off-set 은 자중에 의한 것이다.

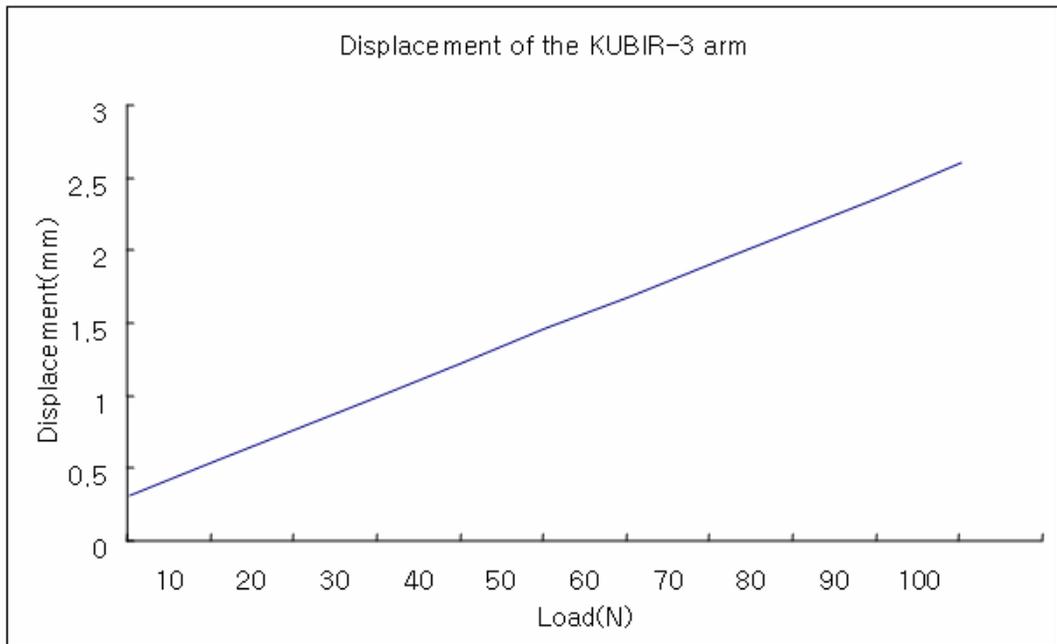


Fig. 5.3 Displacement of the KUBIR-3 arm

다음 그림은 로봇 팔의 자중과 외력 100N에 대한 구조해석 결과이다. 아래의 Fig. 5.4 와 Fig. 5.5 에서 하중에 따른 응력과 변형량 발생이 부위별로 다르게 나타난다. 그래서 로봇 팔의 모델링 색상이 다르게 발생하는 것이다. 색상에 따른 수치는 그림 왼쪽의 그래프에 자세히 나타내고 있다. 이 그래프에서 응력해석 결과는 어깨 부위의 팔꿈치 구동 4절 링크 구조 볼 나사에서 최대 응력 72.2(MPa)이 발생하고, 그립퍼 부위에서 최소로 발생하는 것을 알 수 있다. 또한 변형량해석 결과는 그립퍼에서 최대 변형량 2.6(mm)가 발생하고, 로봇 팔 위로 올라 갈수록 변형량이 줄어 든다는 사실을 알 수 있다.

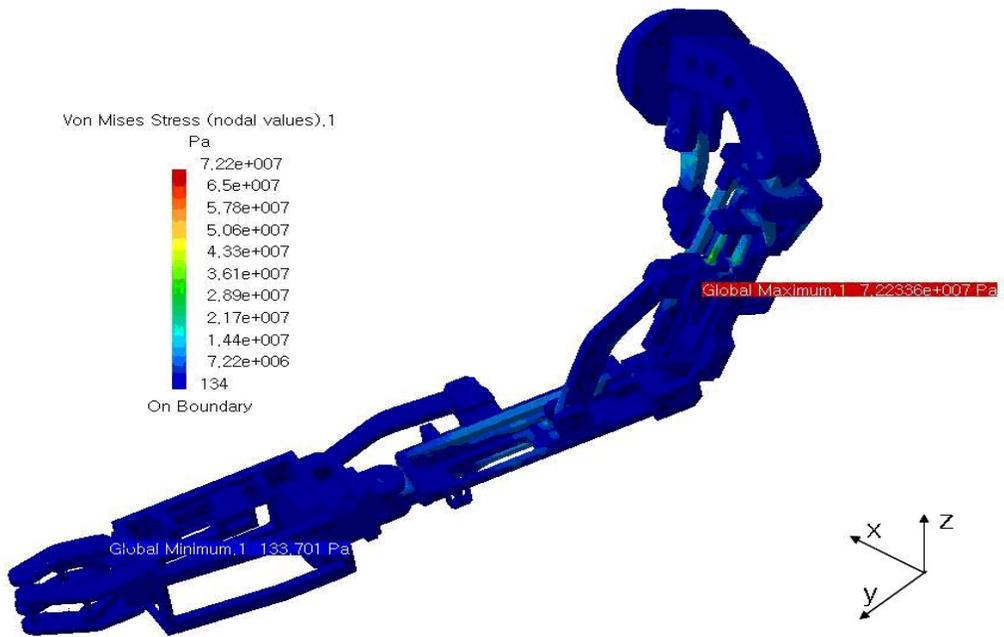


Fig. 5.4 FEM stress result of the KUBIR-3 arm

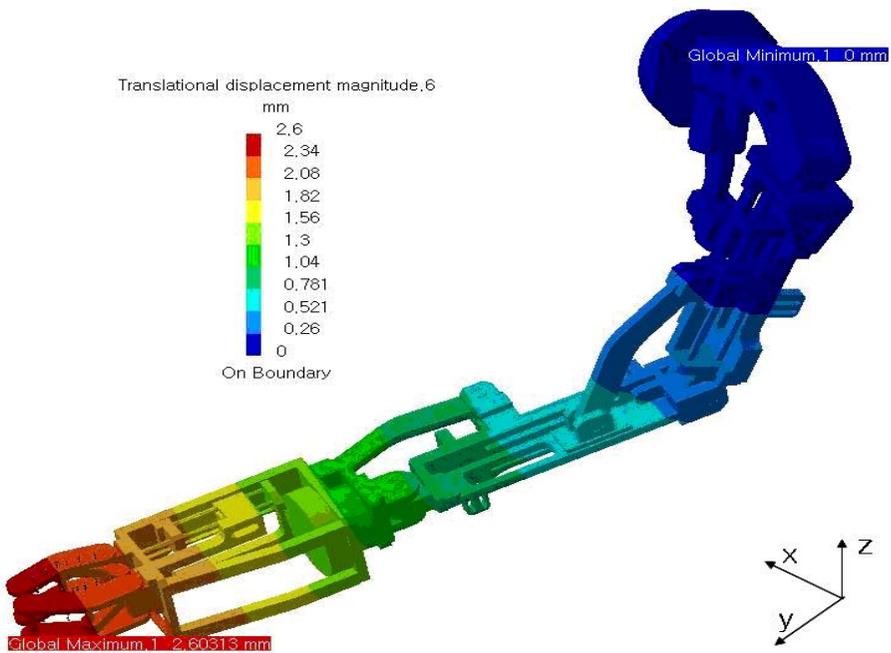


Fig. 5.5 FEM displacement result of the KUBIR-3 arm

5.2.2 이족보행로봇 다리의 유한요소 해석

로봇 다리는 허벅지와 무릎 그리고 발목의 4절 링크 관절 구동 구조와 발목의 균형을 위한 회전으로 이루어져 있으며, 로봇 다리의 모든 프레임들은 상체의 모든 부하에 견딜 수 있게 설계를 하였다. 그래서 허리 부분의 균형관절을 제외한 다리 하나를 기준으로 발의 바닥면을 고정으로 정하고, 로봇 기구부 중앙 상단부분에 중력방향으로 총 700N의 물체가 작용하고 있다는 가정에서 시뮬레이션을 실행하였다. 여기서 총 700N에 대한 응력의 결과해석은 Fig. 5.7 이고, 변형량의 결과해석은 Fig. 5.8 이다.

Table 5.4 Displacement and stress of the KUBIR-3 leg

Load(N)	Stress(MPa)	Displacement(mm)
0	2.15	0.033
100	5.05	0.124
200	8.61	0.214
300	12.2	0.305
400	15.7	0.396
500	19.3	0.487
600	22.9	0.577
700	26.5	0.668

Table 5.4 도 상체의 자중과 로봇 다리의 자중이 작용한 700N까지 순차적으로 적용시켜 로봇 팔과 같은 방법으로 시뮬레이션을 실행하여 얻은 결과 값이다. 아래 Fig. 5.6 의 그래프처럼 하중의 증가에 따라 변형이 비례적으로 늘어남을 알 수 있다. 이 결과처럼 로봇 다리에 발생한 응력은 Table 5.1 에서 모든 재질의 항복응력 범위 안에 들어있고, 최대 변형량도 최소한으로 작용하여 안전한 설계라고 정의 할 수 있다. 로봇 자중이 대략 70kgf이므로 보행 시에 한쪽 다리는 들고 있을 때 한쪽 다리가 지지하게 된다. 이와 같은 시뮬레이션 결과로 다리의 변형량이 0.67(mm)이므로 안정된 보행 동작을 위해서는 이를 고려한 제어 방법이 필요할 것이다.

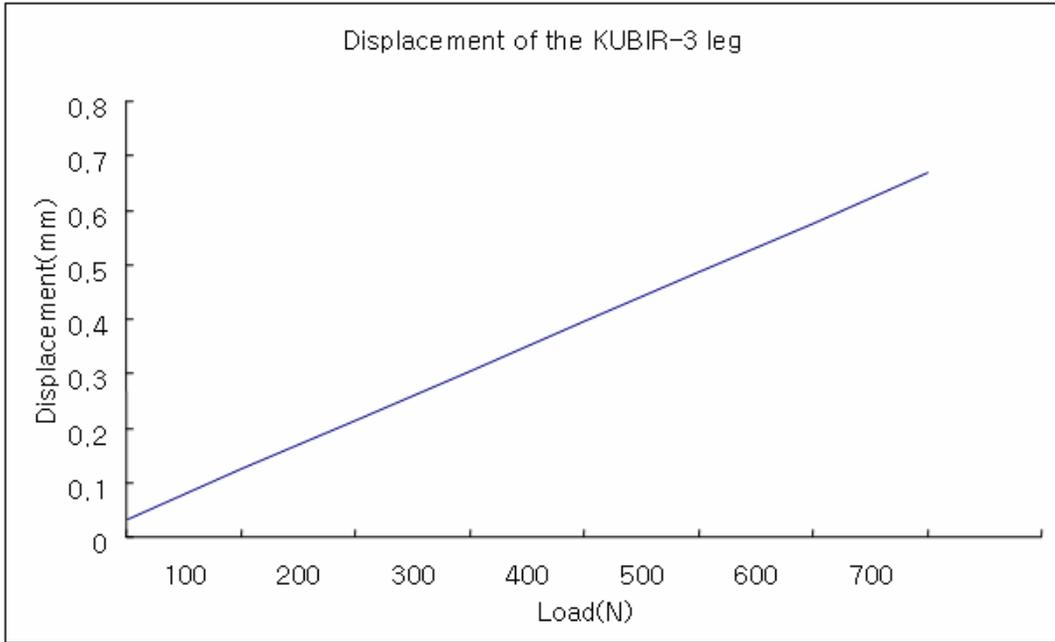


Fig. 5.6 Displacement of the KUBIR-3 leg

다음 그림은 로봇 다리의 상체의 자중과 로봇 다리의 자중이 작용한 700N에 대한 구조해석 결과이다. 아래의 Fig. 5.7 와 Fig. 5.8 은 로봇 팔과 같은 하중에 따른 응력과 변형량 발생이고, 모델링 색상 역시 다르게 발생한다. 그래서 색상에 따른 수치는 그림 오른쪽의 그래프에 자세히 나타내고 있다. 로봇 다리의 그래프에서 응력해석 결과는 바다면과 가까운 발목 4절 링크 구조의 볼 나사 근처에서 최대 응력 26.5(MPa) 이 발생하고, 하중 입력 부위에서 최소로 발생하는 것을 알 수 있다. 그리고 변형량해석 결과는 응력 해석 결과와 다르게 하중 입력 부위에서 최대 변형량 0.668(mm)가 발생하고, 로봇 다리 아래로 내려 갈수록 변형량이 줄어 든다는 사실을 알 수 있다.

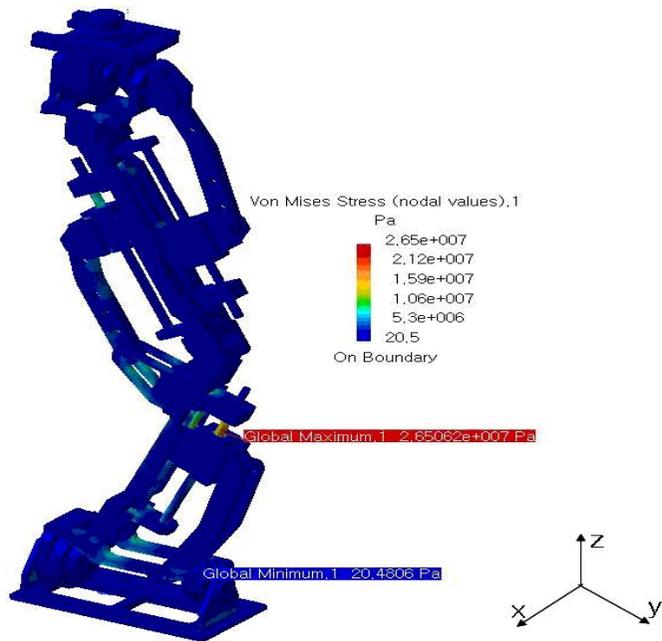


Fig. 5.7 FEM stress result of the KUBIR-3 leg

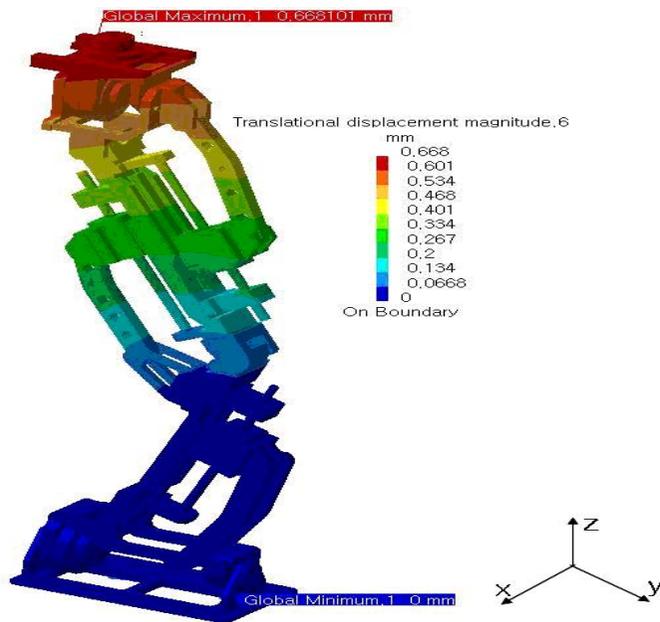


Fig. 5.8 FEM displacement result of the KUBIR-3 leg

제 6 장 이족보행로봇의 외장케이스 설계

이 장에서는 이족보행로봇의 상용화의 중요성과 부드러운 이미지 그리고 내부 제어기의 보호를 위한 외장 케이스에 대해 소개한다.

6.1 외장케이스의 3D 설계와 금형 제품

3D 프로그램 CATIA를 이용하여 로봇 프레임과 관절의 운동에 간섭이 발생하지 않도록 외장 케이스를 모델링 하였다. 그리고 모델링 데이터 자료로 CNC 밀링머신으로 5축 가공하여 알루미늄 금형을 가공 하였다. 아래 Fig. 6.1 은 CATIA 3D 모델이고, Fig. 6.2 는 KUBIR-3 실물을 나타내고 있다.

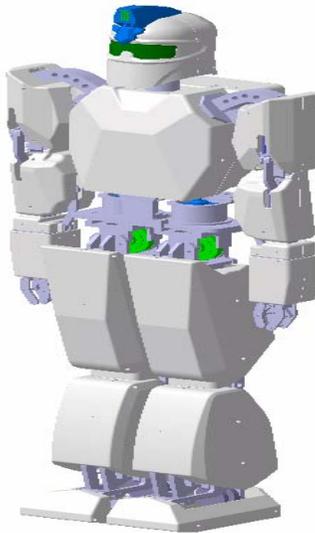


Fig. 6.1 3D model of the KUBIR-3 cases

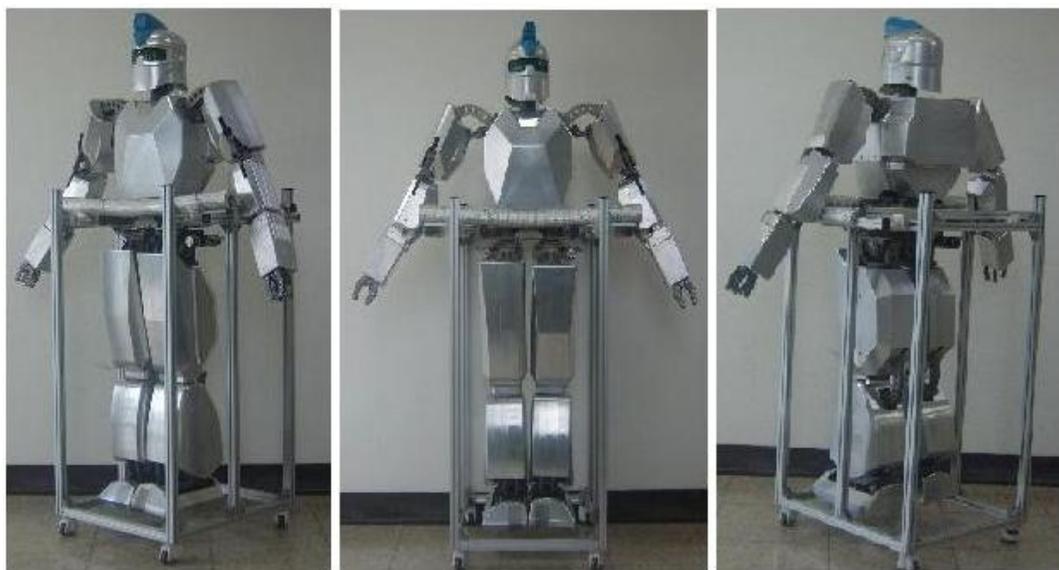


Fig. 6.2 The KUBIR-3 cases

6.2 외장케이스의 경량화

Table 6.1 은 알루미늄과 플라스틱 외장 케이스의 중량을 나타내고 있다. 그래서 로봇의 경량화가 목적이기에 알루미늄 재질을 플라스틱 실리콘 주형으로 가공하여 외장 케이스를 성형하였을 때 1/3 정도 경량화 될 수 있음을 알 수 있다.

Table 6.1 Material weight of the robot cases

	Aluminum case Weight(kgf)	Plastic case Weight(kgf)
Head	1.7	0.63
Body	6.9	2.6
Shoulder	3.6	1.3
Elbow	2.6	0.96
Wrist	2.0	0.74
Thigh	9.2	3.4
Knee	6.4	2.37
Ankle	2.4	0.89
Total	34.8	12.89

제 7 장 결론

본 논문에서는 기존에 개발된 이족보행로봇(KUBIR)을 구조적으로 보완하였다. 인간 움직임과 유사한 팔의 적용과 매끈한 외형 케이스를 부착하기 위해 로봇 프레임을 CATIA 3D 모델링으로 구조 해석하여 이전보다 강성은 높으며 무게는 경량화된 27자유도의 KUBIR-3를 설계하는데 주안점을 두어 제작하였다.

KUBIR-3는 고중량물 이송이 가능하도록 4절 링크 메커니즘을 팔과 다리에 각각 3자유도씩 적용하여 일반 성인 크기에 중점을 두어 설계하였다. 머리 부는 2개의 카메라를 장착하여 2자유도로 전방 및 측면 시야를 확보 가능하게 하였다. 그리고 몸체 부는 로봇 보행 시 원활한 움직임 구현을 위해 허리 중심에 하나의 자유도를 추가하였으며, 팔과 다리 부분은 6자유도로 작업공간의 원하는 위치 및 인간과 유사한 움직임이 가능하게 하였다. 또한 각각 프레임을 CATIA 3D 모델링으로 설계와 구조 해석을 하였기에 조립 시 간섭체크와 무게의 경량화가 되었다.

로봇 기구학 해석은 허리부의 1 자유도를 기준 좌표계로 KUBIR-3의 머리 카메라, 팔의 그리퍼, 다리의 바닥면의 말단 위치벡터를 얻었다. 그래서 다리 부분을 다시 역으로 바닥면부터 허리 기준 좌표계까지 기구학 해석을 실시하였다. 이는 바닥면부터 머리의 카메라와 팔 그리퍼의 말단위치벡터를 다시 얻을 수 있게 한 것이다. 이렇게 로봇 보행 시 바닥의 좌표를 읽어 들여 머리의 카메라와 팔 그리퍼의 위치의 도달점의 파악이 가능하게 하였다.

설계에서 팔 구동의 변경과 중량 감소로 새로이 관절 구동기 해석이 필요하였다. 그래서 부하토크 계산식을 얻었다. 이 결과에 맞추어 모터를 선정하였고, 그 결과 성능이 향상된 관절 구동기로 안정된 보행이 가능하게 하였다.

로봇이 고중량물에 대한 구조 해석을 위해 시뮬레이션을 팔과 다리 조립상태에서 실시하였다. 시뮬레이션 결과 수치와 로봇 프레임 재질의 기계적 성질과 비교하여 안전성을 검증하였다. 또한 3D 모델링으로 외형 케이스 금형을 제작하여 친숙한 로봇으로 향상시켰다. 앞으로 알루미늄 재질을 플라스틱 주형으로 제작하여 외장 케이스 경량화가 가능하다는 것을 확인하였다.

참 고 문 헌

[1] <http://asimo.honda.com/>

[2] K. Harada, et al, "A Humanoid Robot Carrying a Heavy Object", Proc. IEEE International Conf. on Robotics and Automation, pp. 1724-1729, 2005.

[3] J.H. Kim, S.W. Park, I.W. Park, and J.H. Oh, "Development of a Humanoid Biped Walking Robot Platform KHR-1 - Initial Design and Its Performance Evaluation", in Proceedings of 3rd IARP Int. Workshop on Humanoid and Human Friendly Robotics, pp. 14-21, Tsukuba, Japan, DEC.2003.

[4] 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.

[5] M. Vukobratovic. Mathematical Models of Legged Locomotion Robots. Mihailo Pulpin Institute Beograd, 1975.

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

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

[8] 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.

[9] 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.

[10] 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.

[11] 박인규, 김진걸, 김기식, “ 이족 보행 로봇을 위한 슬라이딩 제어기 설계”, 한국정밀공학회지 제18권 제5호(2001년 5월), pp. 137~146, 2001.

[12] 최형식, 오주환, 이상준, “KSME 25자유도 인체크기 이족보행로봇의 개발”, 대한기계학회 춘계학술대회 논문집.

[13] 김정엽, 박일우, 오준호, “휴머노이드 로봇 KHR-2의 개발”, 제어 자동화 시스템공학 논문지 10권 4호(2004년 7월), pp. 29~34

[14] 정영진, “해외 로봇 연구동향”, 제어 자동화 시스템공학 논문지 11권 2호(2005년 2월), pp. 22~27

[15] 이호길, “로봇의 운동 패턴학습”, 제어 자동화 시스템공학 논문지 12권 1호(2006년 3월), pp. 36~44