



저작자표시-비영리-동일조건변경허락 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.
- 이차적 저작물을 작성할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



동일조건변경허락. 귀하가 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공했을 경우에는, 이 저작물과 동일한 이용허락조건하에서만 배포할 수 있습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공학석사학위논문

6족 보행 로봇의 전방향 이동 보행 제어를 위한 연구



2013년 2월

부경대학교 대학원

메카트로닉스 협동과정

정우영

공학석사학위논문

6족 보행 로봇의 전방향 이동 보행
제어를 위한 연구



부 경 대 학 교 대 학 원

메카트로닉스 협동과정

정 우 영

정우영의 공학석사 학위논문을 인준함.

2013년 2월



주 심 공학박사 이 일 영 (인)

위 원 공학박사 최 연 옥 (인)

위 원 공학박사 김 상 봉 (인)

목 차

목 차	i
Abstract	iii
제 1 장 서 론	1
1.1 연구 배경 및 동기	1
1.2 연구 방법 및 목적	6
1.3 연구의 구성 및 내용	7
제 2 장 6족 보행 로봇 시스템구성	9
2.1 6족 보행 로봇 시스템 구성 및 제원	9
2.2 6족 보행 로봇의 제어 시스템 구성	14
제 3 장 6족 보행 로봇 모델링 및 제어기 설계	16
3.1 6족 보행 로봇 기구학적 모델링	16
3.2 6족 보행 로봇 제어기 설계	20
제 4 장 생명체의 걸음새를 모방한 보행 알고리즘	26
4.1 생명체의 걸음새	26
4.1.1 3점 접지 보행	28
4.1.2 4점 접지 보행	29
4.1.3 5점 접지 보행	30
4.2 6족 보행 알고리즘	31
제 5 장 시뮬레이션 및 실험 결과	35
5.1 시뮬레이션	35

5.1.1 시뮬레이션 결과	36
5.1.2 3점 접지 보행	39
5.1.3 5점 접지 보행	42
5.2 실험	44
5.2.1 실험결과	45
제 6 장 결론	52
References	55
Publications and Conferences	61
부 록	62
감사의 글	65



Omni –directional walking control for Hexapod Robot

Woo Young jeong

Dept. of Interdisciplinary Program of Mechatronics Engineering

The Graduate School, Pukyong National University

Abstract

This paper introduces omni-directional walking control for a hexapod robot. The hexapod robot consists of its body and six legs with three links and three rotational joints. Kinematic modeling for one leg of the hexapod robot is proposed. Each angle of leg joints can be calculated by inverse kinematic. But inverse kinematic problem is difficult and complex to represent relation between angle of joint and end effector. Therefore, a controller is designed to track a given trajectory of a leg with smooth and uniform velocity using differential kinematic algorithm based on backstepping method and Lyapunov stability. Walking motion algorithms are designed for walking sequence and stability based on gaits of living-organisms. The proposed controller and walking motion algorithm are applied to six legs of hexapod robot. A control system is developed based on DSP TMS320F28335 micro-controller and AX-12A servo motor with half duplex communication. Simulation and experimental results

for walking motion of the hexapod are shown to prove the effectiveness and applicability of the proposed controller.



제 1 장 서 론

1.1 연구 배경 및 동기

시대가 변하고 사람들의 요구가 다양해짐에 따라 로봇도 여러가지 형태로 진화해가고 있다. 초기 산업용으로 주로 사용된 로봇은 현재 가정, 병원, 건설현장, 공장, 전시관, 학교, 군대 등 사회 전반에 걸쳐서 활용되고 있다. 또한 휴머노이드 로봇, 엔터테인먼트 로봇, 의료 로봇, 산업용 로봇, 교육 로봇, 탐사로봇, 군사로봇 등 그 종류도 다양하다.

로봇의 이동 방식으로는 크게 두 가지 방식으로 구분할 수 있다. 첫 번째로 가장 보편적으로 사용되는 휠(Wheel)을 이용한 이동 방식이다. 휠을 이용한 이동 로봇들은 산업공정뿐만 아니라 병원, 전시장, 가정 등 인간의 생활공간에서 다양한 일들을 수행하는데 매우 유용하게 사용되고 있다. 대표적인 활용 예로서 Fig. 1.1 또는 Fig.1.2와 같은 산업현장의 AGV(Automated Guide Vehicle)가 있다. AGV는 산업현장에서 각종 화물을 자동으로 이송하며 장애물을 피해가고 스스로 최적의 경로를 찾는 등 많은 발전이 이루어졌다. 그러나 휠을 이용한 이동로봇은 포장된 도로나 정해진 트랙을 따라가는 등 이동지형에 그 한계가 있다.



Fig. 1.1 AGV(Automated Guide Vehicle)



Fig. 1.2 Folk lift AGV

산업사회가 발전함에 따라 우주, 화산, 심해 탐사, 원자력 발전소, 군사작전 등 극한 환경에서의 작업이 많아지고 있다. 극한 환경에서 작업을 수행하는 로봇 중 휠이나 궤도를 이용한 이동로봇은 에너지 효율 면에서는 좋지만 이동 능력의 한계로 작업 수행에 제한이 있다. 따라서, 극한 작업 환경을 극복하고 작업자의 안전을 보장하기 위한

대안으로 여러 선진국에서는 인간이나 동물을 닮은 보행 로봇을 개발하고 있으며 이를 개선, 발전시켜 나가고 있다.

보행 로봇은 오랜 기간 동안 진화해온 생명체의 이동방식 체계, 구조, 행동 등을 조사하여 공학적으로 분석하여 이동로봇에 적용한 로봇이며, 몸체에 연결된 다리 개수에 따라 1족, 2족, 3족, 4족, 6족 및 다족 등 다양하게 분류된다. 보행 로봇은 휠을 사용하는 로봇에 비하여 속도 면에서는 우수하지 못하지만, 비포장 또는 굴곡이 있는 불규칙한 지형에서의 작업 능력은 우수하다. 보행 로봇의 연구는 크게 2족, 4족, 6족 보행 로봇 위주로 세계에서 많이 진행되어지고 있다. 2족, 4족 보행 로봇은 6족 보행 로봇보다 속도 면에서 뛰어나며, 6족 보행 로봇은 안정성 측면에서 뛰어나다.

보행 로봇에 관한 연구는 많은 과학자와 엔지니어에 의해 진행되고 있다[1~11]. 특히 4족 보행 로봇은 불규칙한 지형을 극복하기 위한 다양한 연구가 진행되고 있어, Fig. 1.3의 'Big dog'이 그 대표적인 예이다[12~17].

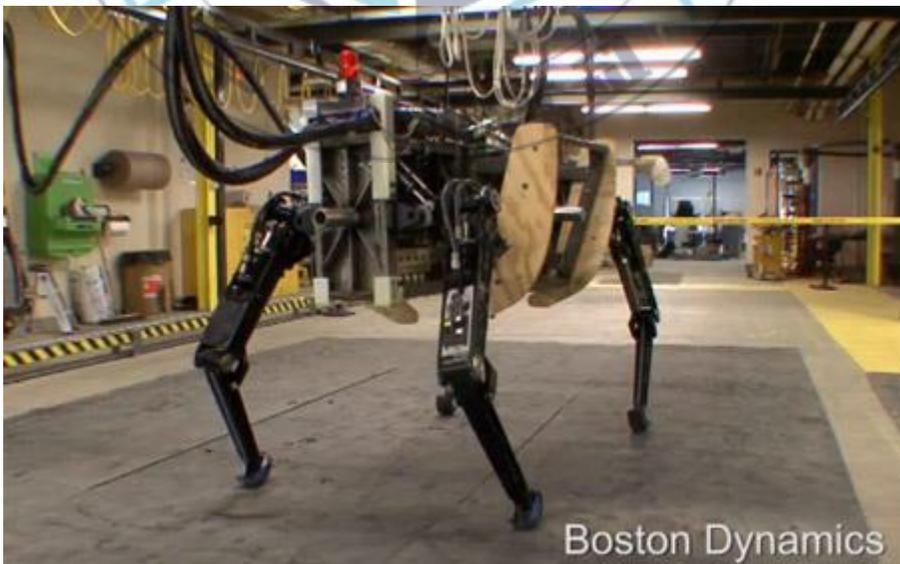


Fig. 1.3 Quadruped robot 'big dog' of Boston Dynamics

이에 반해 6족 보행 로봇은 4족 보행 로봇에 비해 연구가 미진한 상태이며, 다리의 수가 많아 움직이는 다리 순서를 정할 알고리즘에 대한 추가적인 연구가 필요하다. [18~27] Fig. 1.4는 6족 보행 로봇의 예를 보여준다.



Fig. 1.4 Hexapod robots 'A-pod'.

M. Piatek 등은 생체모방공학을 적용한 6족 보행 로봇의 걸음새를 제안하였다. 이들은 곤충의 걸음새를 모방하여 6족 보행 로봇에 적용할 보행 알고리즘을 제안하였고, 각 다리를 제어 하기 위해 역기구학 제어 알고리즘(Inverse kinematic control algorithm)을 사용하였다. 이 보행 알고리즘은 단순하고, 반복적인 동작을 반복함으로써 6족 보행 로봇의 보행을 구현하였다. 그러나 각 다리와 몸체의 이동 속도를 고려하지 않았다. 또한 각 관절과 End effector의 위치 사이의 관계식을 나타내기 위해 역기구학(Inverse kinematic)을

사용하였다. 역기구학은 매우 복잡하고 다양한 방식으로 각 관절과 End effector의 위치를 나타내는 관계식을 구할 수 있고 그 해는 하나가 아니며 경우에 따라 그 해를 구할 수 없으므로 그 관계식은 비선형이다. 따라서, 역기구학 제어 알고리즘을 사용하기 위해서는 시스템을 선형화할 필요가 있으며 경우에 따라 다양한 해를 가질 수 있으므로 제어기 자체에 불안요소를 가지고 있게 된다[28]. T. T. Lee 등은 6족 보행 로봇의 등속 보행을 위한 다리 끝점의 'Straight line motion'을 제안하였다. 'Straight line motion'은 보행 시 다리 끝점이 일정한 속도로 동작하여 6족 보행 로봇의 등속보행을 구현하였다. 그러나 이들은 가장 심플한 형태의 보행 알고리즘을 사용하였기 때문에 다양한 보행법에 대한 적용가능성을 확인하지 않았다[29]. Shugen Ma 등은 4족 보행 로봇에 대하여 안정적인 전방향 이동 보행을 구현하였다[30]. 그러므로 위와 같은 역기구학 제어 알고리즘의 한계를 극복하기 위하여 한 다리의 제어 알고리즘에 관한 연구와 이를 6개의 다리에 적용하여 6족 보행 로봇의 보행을 구현할 다양한 보행법과 안정적인 걸음새를 기반으로 한 전방향 이동 보행 알고리즘에 관한 연구가 필요하다.

1.2 연구 방법 및 목적

6족 보행 로봇은 2족 보행 로봇 또는 4족 보행 로봇과 같이 관절(Joint)과 링크(Link)로 구성된 6개의 다리를 이용하여 보행하는 로봇이다. 보행 로봇은 휠(Wheel)을 이용하는 이동로봇(mobile robot)보다 험난한 지형 극복에 용이하다.

본 연구의 목적은 6족 보행 로봇의 전방향 이동로봇 보행을 위한 제어알고리즘을 제안하며, 이를 적용한 6족 보행 로봇 개발을 위해 다음과 같이 수행한다. 첫째, 본 연구에 사용된 6족 보행 로봇은 로봇의 몸체와 3개의 링크와 3개의 회전 관절을 가진 6개의 다리로 구성한다. 둘째, 한 개의 다리에 대해 정기구학(Forward kinematic)을 이용하여 모델링한다. 셋째, 로봇이 목표로 하는 자세와 다리의 위치를 위한 18개의 회전 관절의 각도는 역기구학(Inverse kinematic)을 이용하여 계산할 수 있으나 이를 이용하여 다리 끝점의 위치와 각 회전관절의 관계를 수학적으로 계산하기가 매우 복잡하고 어렵다. 이를 극복하기 위하여 Lyapunov 안정성을 기반으로 안정성을 판별하고 백스텝핑(Backstepping)법을 이용하여 하나의 다리를 대상으로 주어진 다리 끝점의 목표궤적(Reference trajectory)을 추적하는 제어를 설계한다. 넷째, 설계된 제어를 6개의 다리에 적용하고 안정적인 전방향 이동 보행을 구현하기 위하여 다족 생명체의 걸음새를 연구하고 6족 보행 로봇에 적용한다. 다섯째, 이러한 제어 알고리즘을 실현하기 위해, 6족 보행 로봇 및 제어 시스템을 제작한다. 제어시스템의 컨트롤러로 DSP (TMS320F28335)를 사용하고 액츄에이터로 AX-12A 서보모터를 사용한다. 컨트롤러와 액츄에이터는 서로 반이중 통신(half duplex community)을 이용하여 통신한다. 마지막으로 시뮬레이션과 실험을 통하여 제안한 제어 알고리즘의 효율성 및 적용가능성을 검증한다.

1.3 연구의 구성 및 내용

본 연구에서는 평탄한 지상에서 전/후/좌/우 전방향으로 이동 가능한 6족 보행 로봇의 보행을 제어하기 위한 제어기를 설계하고 이를 적용하기 위한 6족 보행 로봇의 보행 알고리즘(Walking gait algorithm)을 제안한다. 제어기는 정기구학을 바탕으로 하나의 다리를 대상으로 설계한 목표궤적(Reference trajectory)을 추적하도록 백스텝핑법을 이용하여 설계된다. 다족 생명체의 걸음새를 연구하여 보행 알고리즘을 6족 보행 로봇에 적용한다. 본 연구의 구성 및 내용을 다음과 같이 요약할 수 있다.

제 1장: 6족 보행 로봇의 연구동향을 살펴보고 이에 따른 연구의 배경과 동기를 제시한다. 그리고 본 연구의 목적 및 방법에 대한 간략한 소개와 함께 연구 구성 및 내용을 제시한다.

제 2장: 6족 보행 로봇의 시스템과 제어 시스템의 구성에 대해 서술한다. 6족 보행 로봇은 6개의 다리로 이동하는 6족 보행 로봇이며 각 다리는 3개의 회전 관절과 3개의 링크로 이루어져 있다. 제어시스템의 컨트롤러로 DSP (TMS320F28335)를 사용하고 액츄에이터로 AX-12A Servo motor를 사용한다. 컨트롤러와 액츄에이터는 서로 반이중 통신(half duplex community)을 이용하여 통신한다.

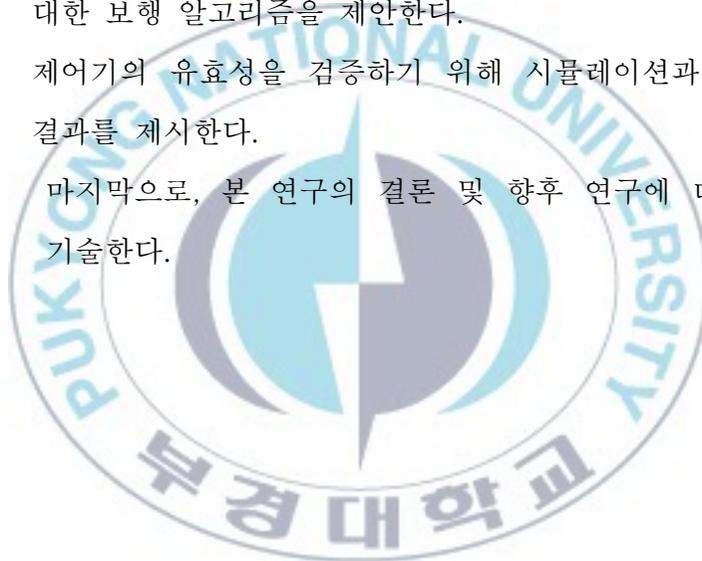
제 3장: 정기구학을 통하여 6족 보행 로봇의 기구학적 모델링을 보이고, 이를 바탕으로 Lyapunov 안정성을

판별하고 백스텝핑법을 이용하여 하나의 다리를 대상으로 설계한 목표 궤적을 추적하는 제어를 설계한다.

제 4장: 제안한 제어를 6개의 다리에 적용시켜 전방향 이동 보행을 구현하는 방법을 연구한다. 보행에 있어서 다수의 다리가 복합적으로 제어되어야 하므로 안정적인 보행을 위한 보행 알고리즘이 필요하다. 다족 생명체의 걸음새를 관찰하고 이를 모방하여 6족 보행 로봇에 대한 보행 알고리즘을 제안한다.

제 5장: 제어기의 유효성을 검증하기 위해 시뮬레이션과 실험 결과를 제시한다.

제 6장: 마지막으로, 본 연구의 결론 및 향후 연구에 대하여 기술한다.



제 2 장 6족 보행 로봇 시스템구성

본 장은 6족 보행 로봇의 시스템 구성 및 제원을 보이고, 제안하는 제어기의 적용대상인 6족 보행 로봇의 제어 시스템에 대해 설명한다.

2.1 6족 보행 로봇 시스템 구성 및 제원

본 연구에서 제안하는 제어기를 실험하기 위한 6족 보행 이동 로봇을 제작한다. Fig. 2.1는 기구설계 프로그램인 카티아(CATIA)를 이용하여 설계한 6족 보행 이동 로봇의 3D 설계도면이다.

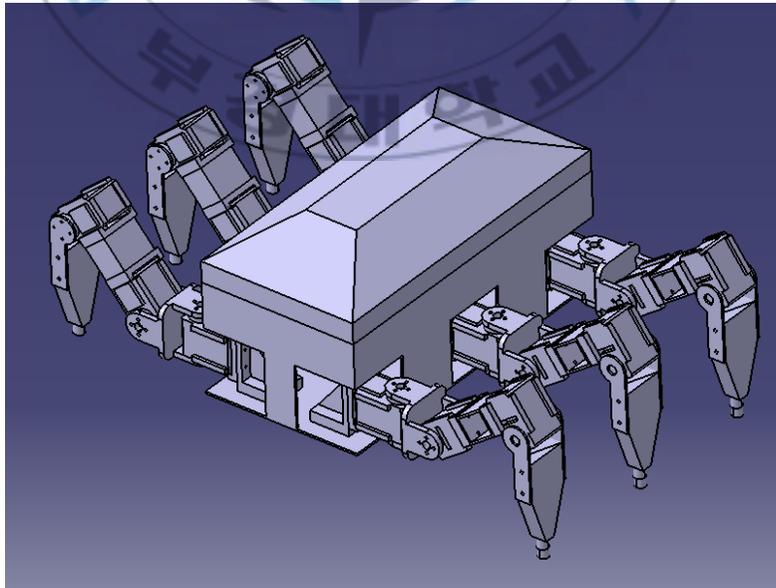
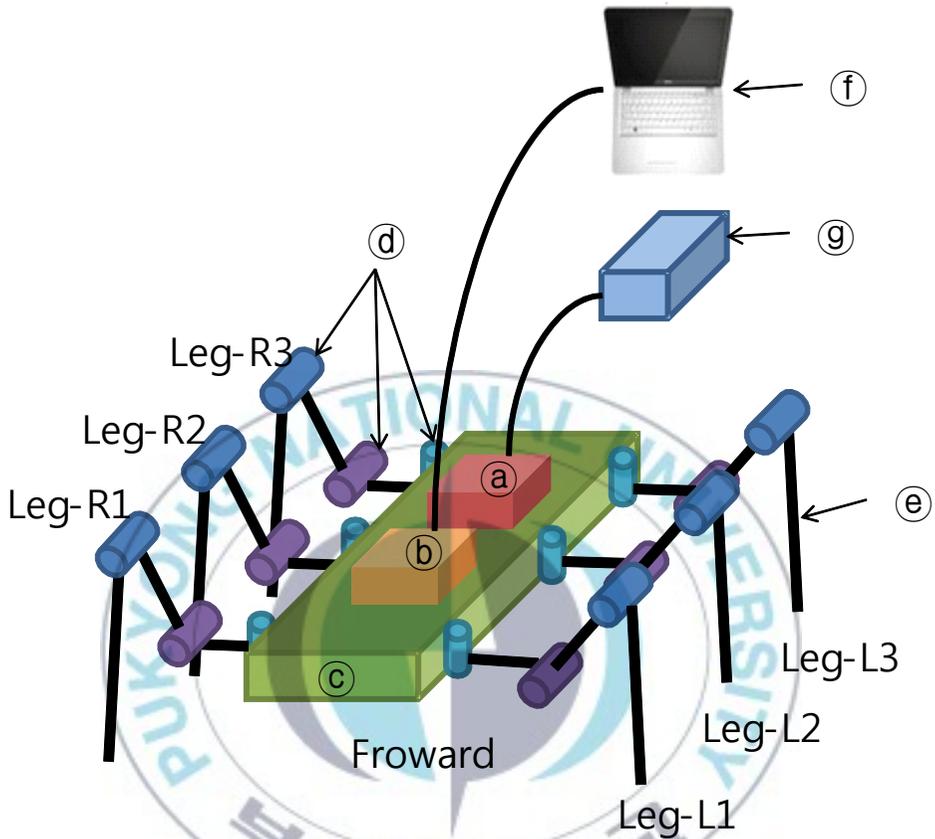


Fig. 2.1 Designed 3D modeling of Hexapod robot

Fig. 2.2은 본 연구를 위해 사용되는 6족 보행 로봇의 구성도이다.



Ⓐ	Micro controller	Ⓑ	Communication system
Ⓒ	Body frame	Ⓓ	Servo motor
Ⓔ	Leg link	Ⓕ	Host computer
Ⓖ	Power supply		

Fig. 2.2 Configuration hexapod robot system used for this thesis

① Micro controller : 시스템을 제어하기 위한 컨트롤러는 Fig. 2.3과 같은 고속의 연산 속도를 가진 DSP(Digital signal processor) TMS320F28335를 이용한다.



CPU	32bit 정수형 C28X Core + FPU
연산능력	150Mhz/150MMAC/300M FLPOS
전압	Core : 1.9V, I/O : 3.3V
메모리	RAM : 68Byte, OTP : 2kByte, Flash : 512kByte

Fig. 2.3 DSP TMS320F28335

② Communication system : 18개의 Servo motor를 제어하기 위해 마이크로 컨트롤러와 각 모터는 SCI data type의 반이중통신(Half-duplex community)방식으로 통신한다. 마이크로 컨트롤러는 각 모터의 속도 및 위치 제어를 하고, 각 모터는 현재 각도와 속도를 측정하여 마이크로 컨트롤러에 전송한다. Fig 2.4는 하나의 모터를 제어하기 위한 회로도이다.

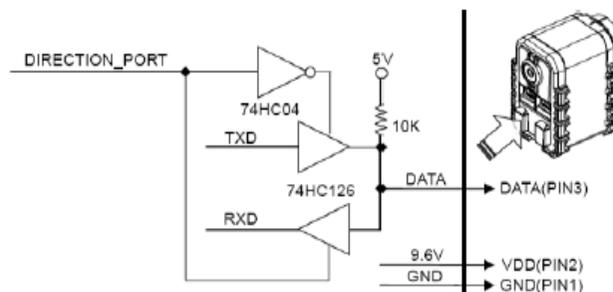


Fig. 2.4 Circuit for communication signal

㉓ Body frame : 재료는 가볍고 단단한 소재인 알루미늄을 가공하여 6족 보행 로봇의 몸체를 구성한다.

㉔ Servo motor : 시스템을 구동하는 액츄에이터로서 Fig. 2.5와 같은 Servo motor인 Dynamixel AX-12A를 이용한다. Dynamixel Ax-12A는 감속기, Driver, Control unit 및 Network 기능까지 일체형으로 구성되어 있는 Module형 Smart actuator이다. 작은 사이즈에도 불구하고 큰 토크를 낼 수 있고 강한 외력에도 견딜 수 있다. 또한 내부 온도 변화나 공급 전압의 변화 등 내부 상황을 스스로 인식하고 처리할 수 있는 기능을 갖고 있다. 각각의 모터는 ID설정이 가능하므로 이를 이용하여, 다수의 모터를 병렬로 연결하여 동시 제어가 가능하다.



최소 제어 각	0.29°
기어 비	254 : 1
사용전압	9 ~ 12 V
Command Signal	Digital Packet
Stall Torque	1.5 N·m
Speed	59rpm

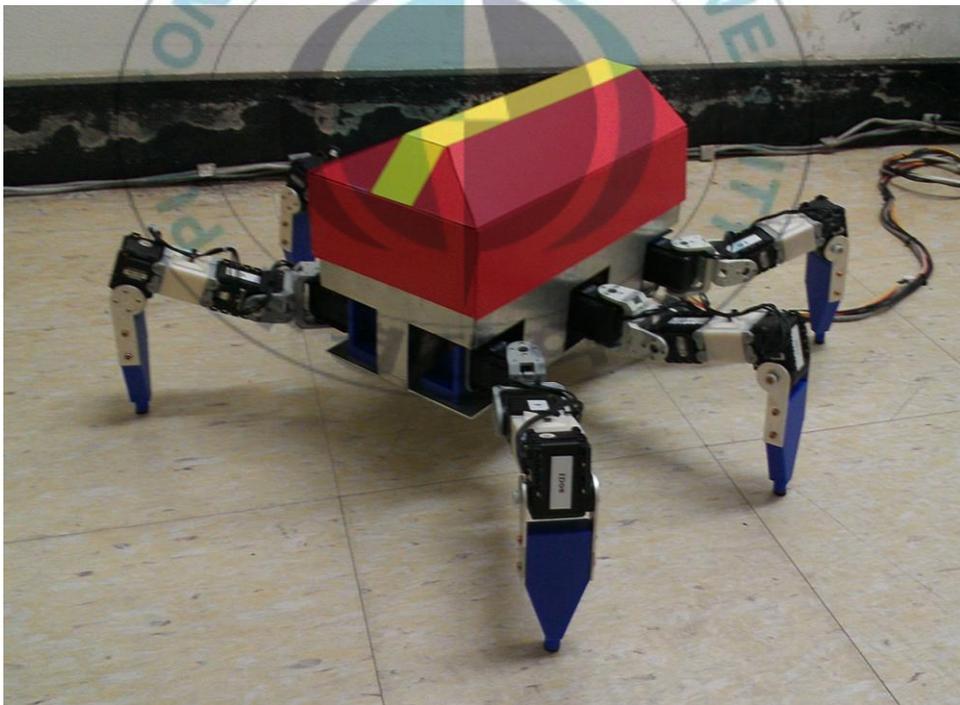
Fig. 2.5 Dynamixel AX-12A

⑤ Leg link : 6족 보행 로봇의 다리는 3개의 링크로 구성되어 있으며 무게를 가볍게 하기 위해 각각 플라스틱으로 제작한다.

⑥ Host computer : 6족 보행 로봇의 구동을 제어하고 제어신호 및 피드백 신호를 실시간으로 확인할 수 있도록 한다.

⑦ Power supply : 6족 보행 로봇에 전원을 공급해 주기 위하여 입력이 교류전원 100~240V(4A), 출력이 직류전원 12V(26A)인 전원공급기를 사용한다.

Fig. 2.6는 설계한 도면을 바탕으로 본 연구를 위해 개발된 실제 6족 보행 이동 로봇이다.



Body	150 x 300 x 155mm
Weight	3.1kg

Fig. 2.6 Developed of Hexapod robot

2.2 6족 보행 로봇 제어 시스템의 구성

6족 보행 로봇 제어를 위한 제어시스템의 구성도는 Fig. 2.7과 같다.

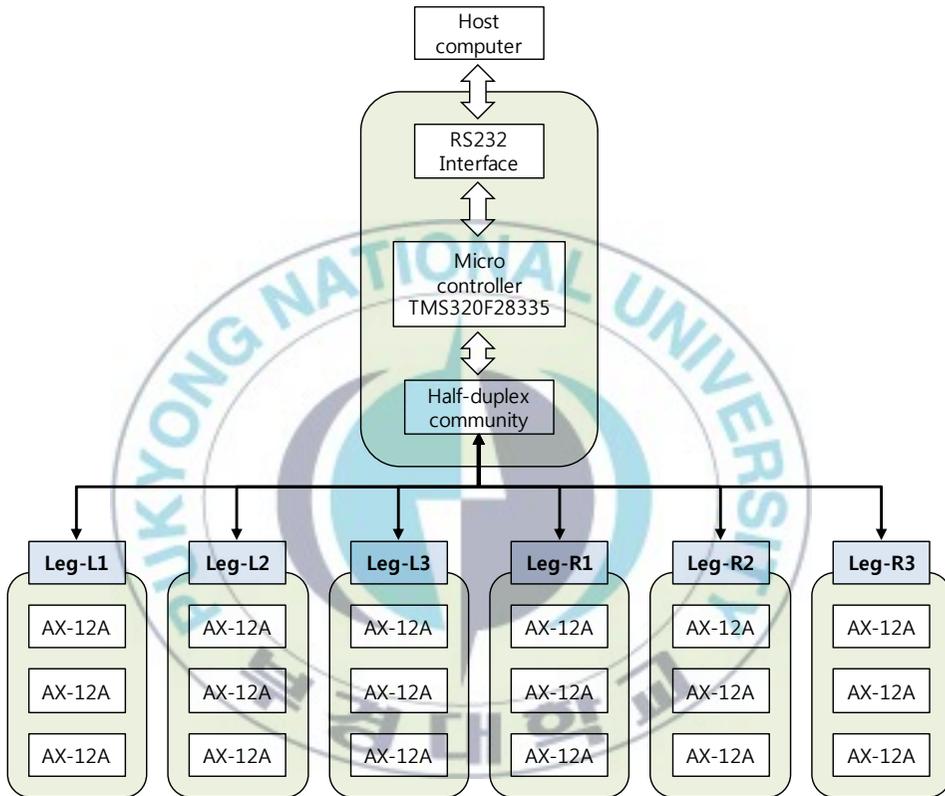


Fig. 2.7 Configuration of control system for hexapod robot

이 제어시스템은 호스트 컴퓨터부, 마이크로 컨트롤러부, 그리고 액추에이터부로 구성된다. 호스트 컴퓨터는 RS232 시리얼 통신을 이용하여 6족 보행 로봇의 수동조작을 위한 명령 전달과 각 모터에서 얻은 각도 및 속도 데이터 값을 수집한다. 마이크로 컨트롤러부는 DSP TMS320F28335를 사용하여 수집된 데이터 값을 이용하여 제어 연산을 수행한 후 반이중 통신 방식을 통하여 모터의 제어 신호를 출력한다.

액츄에이터부는 3개의 서보모터(AX-12A)가 하나의 다리를 제어하고 마이크로 컨트롤러로부터 받은 제어 신호에 따라 다리 끝점(End effector)를 제어한다. Fig. 2.8은 본 연구에 사용하기 위해 개발된 6족 보행 로봇의 제어시스템이다.

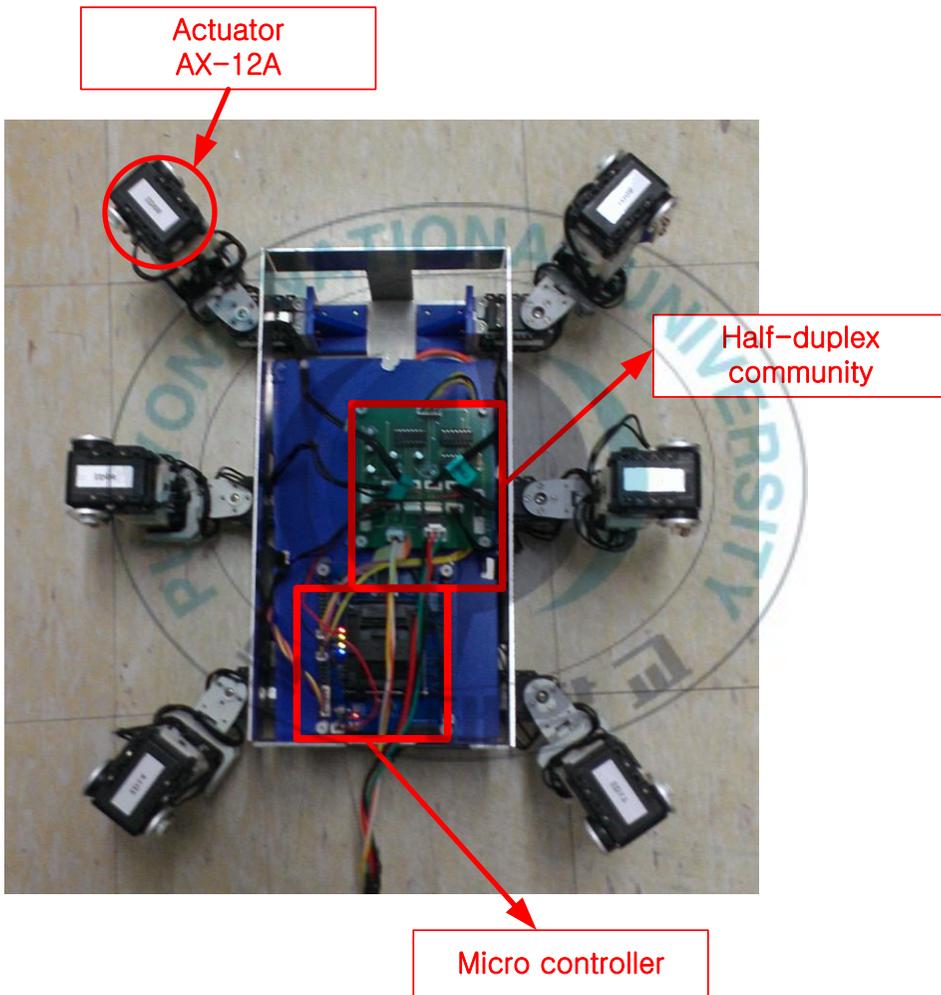


Fig. 2.8 Control system of Hexapod robot

제 3 장 6족 보행 로봇의 모델링 및 제어기 설계

본 장은 정기구학을 이용하여 6족 보행 로봇의 하나의 다리를 기구학적으로 모델링하고, 이를 기준하여 전방향 이동 보행을 위한 제어기를 설계한다. 제안하는 제어기는 Lyapunov 안정성을 기반으로 시스템의 안정성을 판별하고 백스텝핑(Backstepping)법을 이용하여 설계된 다리 끝점의 목표 궤적(Reference trajectory)을 추적한다. Fig. 3.1은 6족 뱀 로봇의 한 개의 다리에 대한 정기구학 모델링을 위한 좌표계이며, 모델링에 사용되는 파라미터는 Table 3.1과 같다.

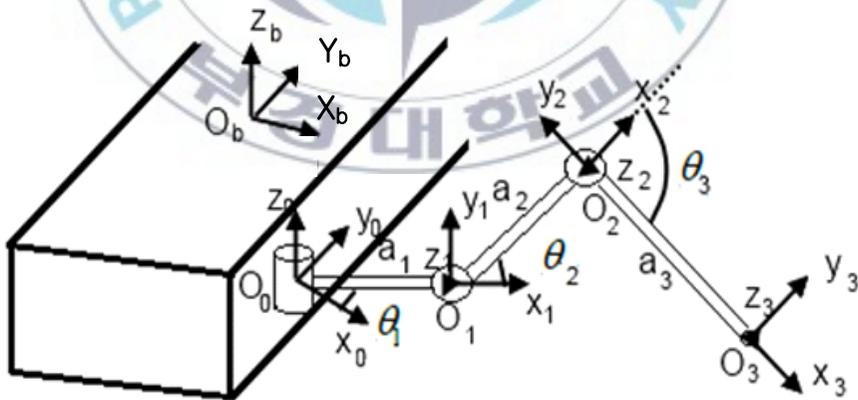


Fig. 3.1 Coordinate of one leg for forward kinematic modeling

Table 3.1 Parameters of one leg for Hexapod robot

Parameters	Description
O_b	몸체의 중심
a_1	어깨 링크(Shoulder link)의 길이
a_2	다리 링크1(Leg link1)의 길이
a_3	다리 링크2(Leg link2)의 길이
θ_1	z_0 축을 중심으로 회전하는 어깨 관절의 회전 각도 (Shoulder joint)
θ_2	z_1 축을 중심으로 회전하는 다리 관절1의 회전 각도 (Leg joint1)
θ_3	z_2 축을 중심으로 회전하는 다리 관절2의 회전 각도 (Leg joint2)
(x_0, y_0, z_0)	어깨 관절(Shoulder joint)의 좌표계
(x_1, y_1, z_1)	다리 관절1(Leg joint1)의 좌표계
(x_2, y_2, z_2)	다리 관절2(Leg joint2)의 좌표계
(x_3, y_3, z_3)	다리 끝점(End effector)의 좌표계
(d_x, d_y, d_z)	(x_0, y_0, z_0) 좌표계에 대한 다리 끝점 좌표

3.1 6족 보행 로봇의 기구학적 모델링

어깨 링크(Shoulder link)와 몸체(Body)는 어깨 관절(Shoulder joint)로 연결되어 있으며 이어서 다리 링크(Leg link)1, 2도 각각 다리 관절(Leg joint)1, 2로 연결되어 있다. 어깨 관절은 (x_0, y_0, z_0) 좌표계가

있고 z_0 축을 중심으로 회전한다. 또한 다리 관절1, 2에도 (x_1, y_1, z_1) 좌표계와 (x_2, y_2, z_2) 좌표계가 있고 각각 z_1 축, z_2 축을 중심으로 회전한다. 다리 끝점(점 O_3)인 End effector는 다리 링크2의 끝점에 위치하며 (x_3, y_3, z_3) 좌표계가 있다. End effector의 좌표 (x_3, y_3, z_3) 는 정기구학을 이용하여 (x_0, y_0, z_0) 좌표계에 대한 위치로 나타낼 수 있다. 즉 각 관절의 각도와 End effector 좌표의 상관관계는 정기구학을 이용하여 나타낼 수 있다. 이를 위하여 각 좌표계의 관계를 Table 3.2와 같이 D-H 매개변수(Denavit Hartenberg Parameters)를 구한다.

Table 3.2 D-H Parameters of 3-link leg

Joint	θ_i	α_i	a_i	d_i
0	θ_1	$-\frac{\pi}{2}$	a_1	0
1	θ_2	0	a_2	0
2	θ_3	0	a_3	0

D-H 매개변수들을 이용한 동차변환행렬(Transformation matrix)은 다음과 같다.

$${}^0_1T = \begin{bmatrix} c_1 & 0 & s_1 & a_1 c_1 \\ s_1 & 0 & -c_1 & a_1 s_1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

$${}^1_2T = \begin{bmatrix} c_2 & -s_1 & 0 & a_2c_2 \\ s_2 & c_1 & 0 & a_2s_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

$${}^2_3T = \begin{bmatrix} c_3 & -s_3 & 0 & a_3c_3 \\ s_3 & c_3 & 0 & a_3s_3 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

$${}^0_3T = {}^0_1T {}^1_2T {}^2_3T = \begin{bmatrix} c_1c_{23} & -c_1s_{23} & s_1 & c_1(a_1 + a_2c_2 + a_3c_{23}) \\ s_1c_{23} & -s_1s_{23} & -c_1 & s_1(a_1 + a_2c_2 + a_3c_{23}) \\ s_{23} & c_{23} & 0 & a_3s_{23} + a_2s_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

여기서 $c_i = \cos \theta_i$, $s_i = \sin \theta_i$, $c_{ij} = \cos(\theta_i + \theta_j)$, $s_{ij} = \sin(\theta_i + \theta_j)$ 이며, i_jT 는 i 좌표계와 j 좌표계 사이의 동차변환행렬이다.

동차변환행렬 식 (3.4)를 이용하면, End effector의 위치를 어깨 관절 좌표계 (x_0, y_0, z_0) 에 대한 위치로 나타낼 수 있다.

$${}^0P = {}^0_3T {}^3P \quad (3.5)$$

여기서 iP 는 i 좌표계에서 나타낸 임의의 점 P 의 위치이다.

그러므로 어깨 관절 좌표계 (x_0, y_0, z_0) 에 대한 End effector vector $\mathbf{k}(\boldsymbol{\theta})$ 는 식 (3.5)의 이동 변화 부분이므로 정기구학 식으로 나타내면 다음과 같다.

$$\mathbf{k}(\boldsymbol{\theta}) = \begin{bmatrix} d_x \\ d_y \\ d_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_1(a_1 + a_2c_2 + a_3c_{23}) \\ s_1(a_1 + a_2c_2 + a_3c_{23}) \\ a_3s_{23} + a_2s_2 \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

여기서 $\boldsymbol{\theta} = [\theta_1, \theta_2, \theta_3]^T$ 는 각 링크의 회전각 벡터이다.

3.2 6족 보행 로봇의 제어기 설계

정기구학은 각 관절의 각도를 알 때 End effector의 위치를 계산할 수 있다. 그러나 End effector의 위치를 제어하기 위해서는 End effector가 원하는 위치로 이동하기 위한 각 관절의 각도 및 각속도를 계산해야 한다. 이를 계산하는 방법으로 역기구학(Inverse kinematic)을 사용할 수 있다. 그러나 역기구학 문제는 다음과 같은 이유로 매우 복잡하고 그 해를 구하기가 어렵다.

- 역기구학의 시스템은 주로 비선형이며 경우에 따라 그 해를 구할 수 없다.
- 같은 시스템에 대해 다양한 역기구학 방정식을 유도할 수 있으며 그 해 또한 하나가 아니다.

반면에 미분 기구학식(Differential kinematic equation)은 관절의 각속도와 동작 선속도의 관계를 선형적으로 보여준다. 이는 미분 기구학식을 이용하면 복잡한 역기구학 문제를 쉽게 해결할 수 있는 가능성을 보여준다. 그러므로 제어기를 설계하기 위해 미분 기구학식을 이용하여 시스템을 선형화하고 Lyapunov 안정성을 판별한다. 최종적으로 백스텝핑법을 이용하여 End effector의 목표 궤적을 추적하는 제어기를 설계한다.

6족 보행 로봇이 전방향 이동 보행을 하기 위해서는 Fig. 3.2와 같이 모든 다리가 β 각도의 방향으로 이동이 가능해야 한다. 여기서 β 는 로봇의 보행각이다.

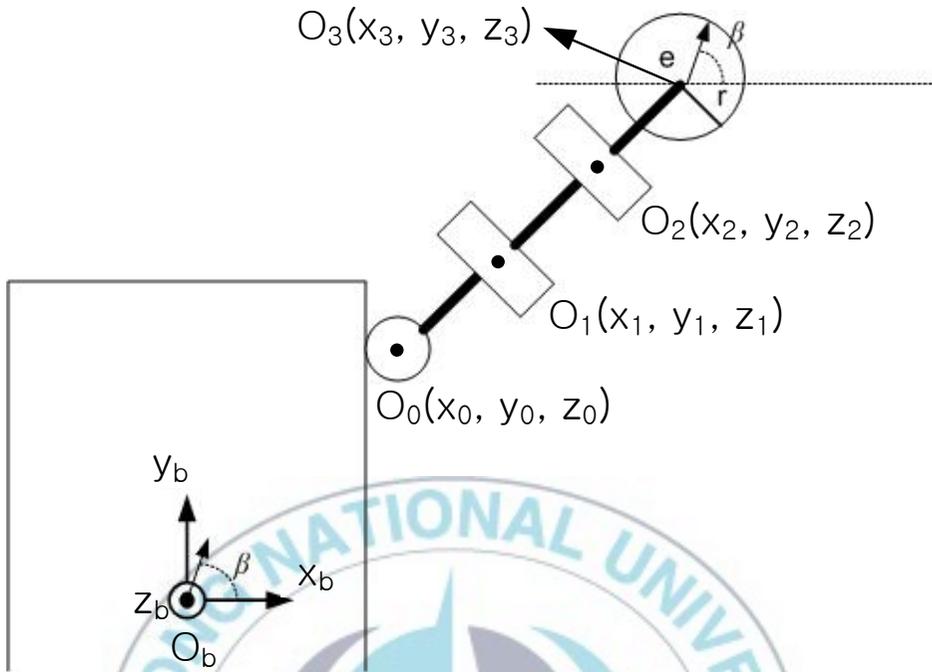


Fig. 3.2 Omni-directional walking motion of one leg

End effector의 초기 위치 벡터(Initial position vector)가 $\mathbf{p}_i = [x_i, y_i, z_i]^T$ 일 때, End effector의 목표 위치 벡터(Desired position vector) $\mathbf{p}_d = [x_d, y_d, z_d]^T$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\mathbf{p}_d = \begin{bmatrix} x_d \\ y_d \\ z_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_i + r \sin \beta \\ y_i + r \cos \beta \\ z_i \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

여기서 r 은 한 스텝(Step)의 이동 거리이다.

End effector의 현재 위치 벡터(End effector position vector)를 $\mathbf{p}_e = [x_e, y_e, z_e]^T$ 라 할 때, 식 (3.6)과 같으므로 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\mathbf{p}_e = \begin{bmatrix} x_e \\ y_e \\ z_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_1(a_1 + a_2c_2 + a_3c_{23}) \\ s_1(a_1 + a_2c_2 + a_3c_{23}) \\ a_3s_{23} + a_2s_2 \end{bmatrix} = \mathbf{k}(\boldsymbol{\theta}) \quad (3.8)$$

추적 오차 벡터(Tracking error vector)는 End effector의 목표 위치 벡터와 현재 위치 벡터의 차로 정의하면, 다음과 같다.

$$\mathbf{e} = \mathbf{p}_d - \mathbf{p}_e \quad (3.9)$$

End effector가 목표 위치에 도달하기 위해 End effector의 병진운동 속도와 각 관절의 각속도 간의 Jacobian 관계를 고려한다. End effector의 현재 위치 벡터(End effector position vector), \mathbf{p}_e , 를 시간에 대해 미분함으로써, End effector의 병진운동 속도를 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\dot{\mathbf{p}}_e = \frac{\partial \mathbf{p}_e}{\partial \boldsymbol{\theta}} \dot{\boldsymbol{\theta}} = \mathbf{J}_A(\boldsymbol{\theta}) \dot{\boldsymbol{\theta}} \quad (3.10)$$

여기서 $\mathbf{J}_A(\boldsymbol{\theta})$ 는 Analytical Jacobian이며, 식 (3.11)과 같이 나타낼 수 있다.

$$J_A(\theta) = \frac{\partial \mathbf{p}_e}{\partial \theta} = \frac{\partial \mathbf{k}(\theta)}{\partial \theta} = \begin{bmatrix} \frac{\partial x_e}{\partial \theta_1} & \frac{\partial x_e}{\partial \theta_2} & \frac{\partial x_e}{\partial \theta_3} \\ \frac{\partial y_e}{\partial \theta_1} & \frac{\partial y_e}{\partial \theta_2} & \frac{\partial y_e}{\partial \theta_3} \\ \frac{\partial z_e}{\partial \theta_1} & \frac{\partial z_e}{\partial \theta_2} & \frac{\partial z_e}{\partial \theta_3} \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

$$= \begin{bmatrix} -s_1(a_3c_{23} + a_2c_2 + a_1) & -c_1(a_3s_{23} + a_2s_2) & -a_3s_{23}c_1 \\ -c_1(a_3c_{23} + a_2c_2 + a_1) & -s_1(a_3s_{23} + a_2s_2) & -a_3s_{23}s_1 \\ 0 & a_3c_{23} + a_2c_2 & a_3c_{23} \end{bmatrix}$$

식 (3.9)을 미분하면, 다음과 같다.

$$\dot{\mathbf{e}} = \dot{\mathbf{p}}_d - \dot{\mathbf{p}}_e \quad (3.12)$$

식 (3.9)과 식(3.10)로부터 식 (3.12)은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\dot{\mathbf{e}} = \dot{\mathbf{p}}_d - J_A(\theta)\dot{\theta} \quad (3.13)$$

시스템의 안정성을 판별하기 위해 Lyapunov function을 다음과 같이 정정 2차 형식(Positive definite quadratic form)으로 나타낼 수 있다.

$$V(\mathbf{e}) = \frac{1}{2} \mathbf{e}^T \mathbf{K} \mathbf{e} \quad (3.14)$$

여기서 K 는 대칭정행렬(Symmetric positive definite matrix)이다.

Lyapunov function은 다음과 같은 조건을 만족한다.

$$V(\mathbf{e}) > 0 \text{ for } \forall \mathbf{e} \neq 0, V(0) = 0 \quad (3.15)$$

식 (3.14)을 미분하여 식 (3.12)와 식 (3.13)를 대입하면 식 (3.16), 식 (3.17)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\dot{V}(\mathbf{e}) = \mathbf{e}^T K \dot{\mathbf{e}} = \mathbf{e}^T K \dot{\mathbf{p}}_d - \mathbf{e}^T K \dot{\mathbf{p}}_e \quad (3.16)$$

$$\dot{V}(\mathbf{e}) = \mathbf{e}^T K \dot{\mathbf{p}}_d - \mathbf{e}^T K J_A(\boldsymbol{\theta}) \dot{\boldsymbol{\theta}} \quad (3.17)$$

제어입력벡터(Control input vector)를 다음과 같이 선정한다.

$$\dot{\boldsymbol{\theta}} = J_A^{-1}(\boldsymbol{\theta}) K \mathbf{e} \quad (3.18)$$

식 (3.18)을 식 (3.17)에 대입하면, 다음과 같이 유도된다.

$$\dot{V}(\mathbf{e}) = \mathbf{e}^T K \dot{\mathbf{p}}_d - \mathbf{e}^T K J_A(\boldsymbol{\theta}) J_A^{-1}(\boldsymbol{\theta}) K \mathbf{e} \quad (3.19)$$

여기서 \mathbf{p}_d 는 목표 위치 벡터로 상수벡터이므로 식 (3.19)은 다음과 같이 유도된다.

$$\dot{V}(\mathbf{e}) = -\mathbf{e}^T K J_A(\boldsymbol{\theta}) J_A^{-1}(\boldsymbol{\theta}) K \mathbf{e} \quad (3.20)$$

식 (3.19)는 $\dot{V} < 0$ 이므로 $\dot{V} < 0$ 와 $V > 0$ 는 시스템 궤적이 $\mathbf{e} = 0$ 에 수렴함을 의미한다. 즉, 시스템은 점근적 안정이다.

식 (3.17)을 오일러 적분법(Euler integration method)를 이용하여 이산 시간으로 적분한다. 여기서 샘플링 시간(Sampling time)이 Δt 일 때, 시간 t_k 에서 관절의 위치와 속도 정보를 알고 있다면, $t_{k+1} = t_k + \Delta t$ 에서의 관절의 위치를 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\theta}(t_{k+1}) &= \boldsymbol{\theta}(t_k) + \dot{\boldsymbol{\theta}}(t_k)\Delta t \\ &= \boldsymbol{\theta}(t_k) + J_A^{-1}(\boldsymbol{\theta}(t_k))\mathbf{K}\mathbf{e}(t_k)\Delta t \end{aligned} \quad (3.21)$$

Fig. 3.3은 설계한 제어기의 블록 다이어그램이다[31].

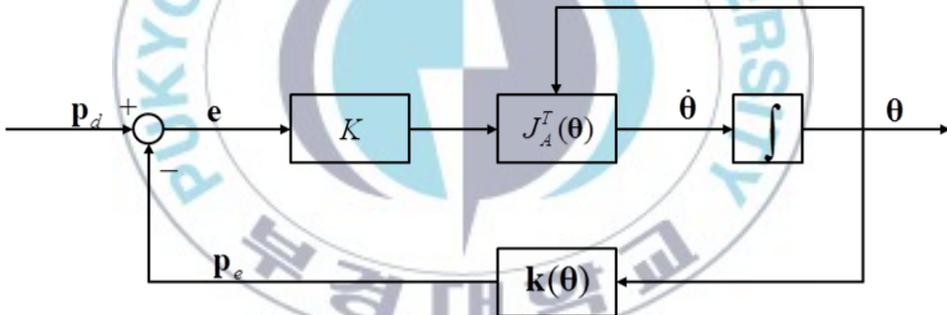


Fig. 3.3 Block diagram of designed controller

제 4 장 생명체 걸음새를 모방한 보행 알고리즘

본 장에서는 3장에서 하나의 다리를 대상으로 제안된 기구학적 모델링과 제어를 6족 보행 로봇의 6개의 다리에 적용하기 위한 보행 알고리즘에 대해 서술한다. 6족 보행 로봇의 안정적인 걸음새를 구현하기 위해서는 6개의 다리를 복합적, 유기적으로 구동해야 하므로 그 구동 순서 및 알고리즘을 설정할 필요가 있다. 이를 위하여 생명체의 걸음새를 6족 보행 로봇에 적용한다. 생명체의 특징을 관찰하여 과학 및 기술에 적용 방안을 연구하는 분야를 생체모방공학이라고 한다. 생체모방공학은 오랜 세월 동안 환경에 적응해 오면서 진화해온 생물들의 생존 방식 및 특징을 모방하여 과학 및 기술에 적용함으로써 많은 문제점을 해결해 왔다. 또한 친환경적이면서 효율이 높아 앞으로의 미래 지향적 기술로서 그 가능성이 주목 받고 있다.

4.1 생명체의 걸음새

6족 보행 로봇의 전체적 형상은 생명체 중 곤충의 형상과 유사하다. 곤충의 다리 구조는 6족 보행 로봇과 같이 3개 또는 그 이상의 다리 관절을 가지고 있고 긴 다리를 이용하여 몸체의 안정성을 확보한다. 보행 시에는 다양한 걸음새를 보이지만, 여러 개의 다리는 항상 몸체의 안정성을 확보하면서 빠르게 이동한다. 이러한 다족

생명체의 걸음새를 관찰하기 위하여 Fig. 4.1과 같은 개미를 생체모방 대상 모델로 선정한다. 또한 6족 보행 로봇에 개미의 걸음새를 적용하기 위해 이동 시 몸체를 지지하는 다리의 수에 따라 그 걸음새를 단순화하여 3점 접지 걸음새(Three point supporting gait), 4점 접지 걸음새(four point supporting gait) 및 5점 접지 걸음새(five point supporting gait)와 같이 세 가지로 분류한다.

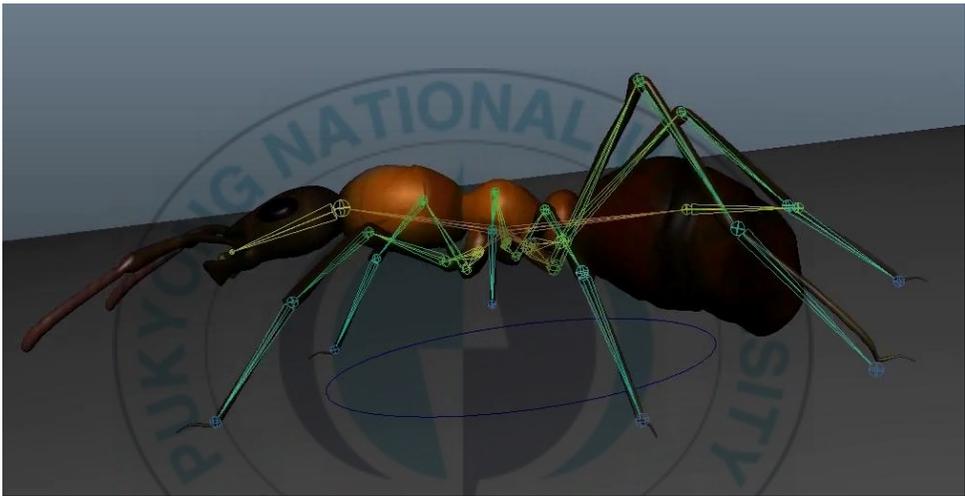


Fig. 4.1 Biomimetic model for Hexapod robot

4.1.1 3점 접지 걸음새

3점 접지 걸음새는 3개의 다리로 몸체를 지지한 상태에서 3개의 다리를 앞으로 움직여 이동하는 방식이다. 이동 시 몸체의 지지는 3개의 다리가 교차하면 반복적으로 수행한다. 다리의 움직임은 다리 끝점이 지면에 닿아 있는 접지상태(Contact ground state)와 다리를 들어올려 공중에 떠있는 부유상태(Lift up state) 두 가지로 분류할 수 있다. 6개의 다리가 모두 한 번씩 부유상태로 다리를 옮기게 되면 이 구간을 걸음새의 1주기라 하고 1주기 내에 수행되는 다리의 동작, 부유 상태의 횟수를 보행사이클(walking cycle)이라 한다. 3점 접지 걸음새는 1주기 내에 3개의 다리를 교차로 움직이며 2 보행사이클을 가지게 된다. 3점 접지 걸음새는 짧은 보행사이클과 단순한 동작으로 빠른 이동 가능하다. Fig. 4.2는 3점 접지 걸음새의 보행사이클을 보여준다.



Fig. 4.2 Walking cycle of three point supporting gait

4.1.2 4점 접지 걸음새

4점 접지 걸음새는 4개의 다리로 몸체를 지지한 상태에서 2개의 다리를 앞으로 움직여 이동하는 방식이다. 이동 시 좌우의 대칭하지 않는 한 쌍의 다리를 순차적으로 움직인다. 각 측면에서 보면 다리가 파도타기 하듯이 순서대로 움직임을 볼 수 있다. 4점 접지 걸음새는 1주기 내에 2개의 다리를 순차적으로 움직이며 3보행사이클을 가지게 된다. Fig. 4.3는 4점 접지 걸음새의 보행사이클을 보여준다.

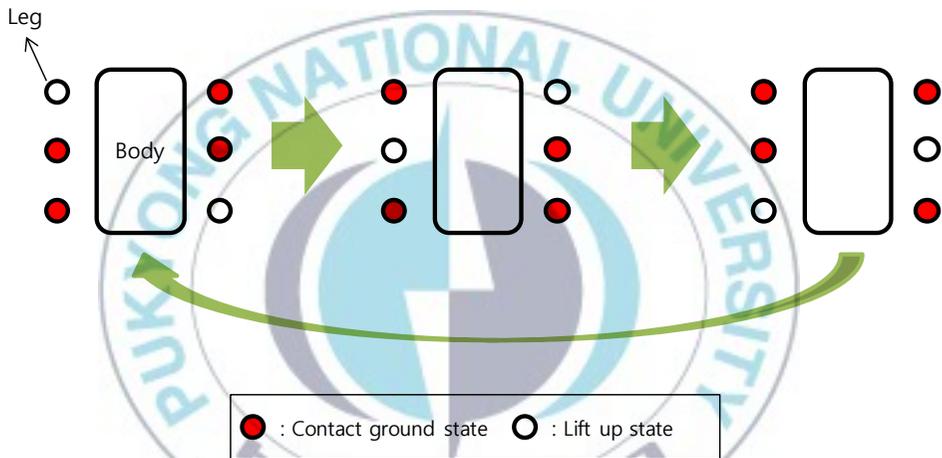


Fig. 4.3 Walking cycle of four point supporting gait

4.1.3 5점 접지 걸음새

5점 접지 걸음새는 5개의 다리로 몸체를 지지한 상태에서 1개의 다리를 앞으로 움직여 이동하는 방식이다. 5점 접지 걸음새는 1주기 내에 1개의 다리를 순차적으로 움직이며 6 보행사이클을 가진다. 5개의 다리가 몸체를 지지하고 있어 3가지 걸음새 중 보행사이클이 길어 이동 속도가 느리지만 가장 안정적인 걸음새이다. Fig. 4.4는 5점 접지 걸음새의 보행사이클을 보여준다.

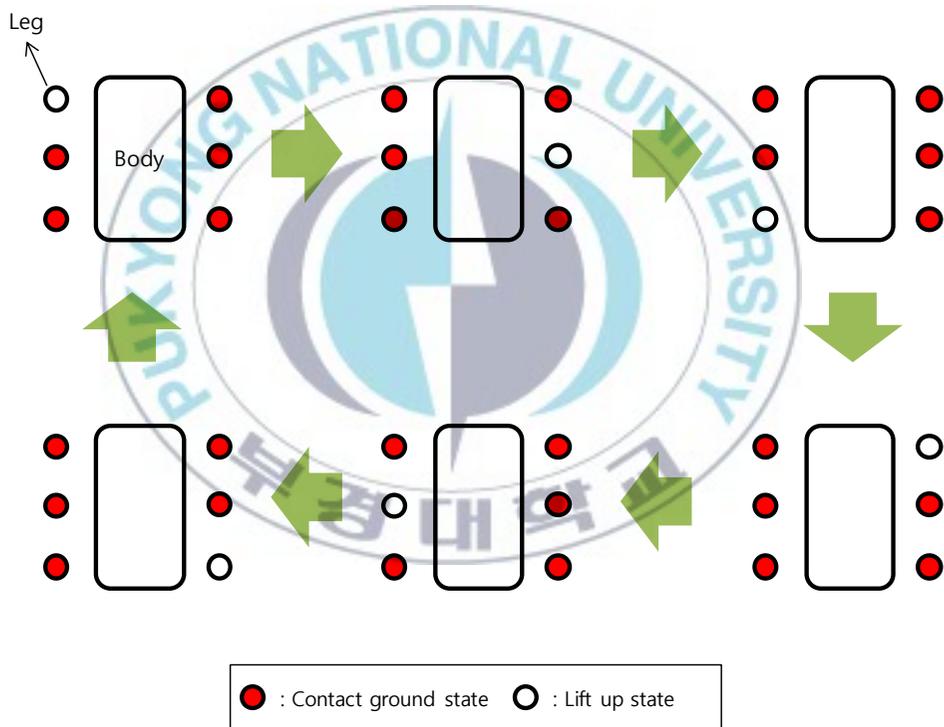


Fig. 4.4 Walking cycle of five point supporting gait

4.2 6족 보행 알고리즘

4.1절에서 6족 보행 로봇에 적용하기 위하여 개미의 걸음새를 이동 시 몸체를 지지하는 다리의 수에 따라 단순화하여 세가지로 분류하였다. 이중 걸음새의 특징이 분명히 나타나는 3점 접지 걸음새와 5점 접지 걸음새를 응용하여 3장에서 제안한 제어기와 함께 6족 보행 로봇에 적용함으로써 3점 접지 보행과 5점 접지 보행을 구현한다. 이 두 가지 보행을 6족 보행 로봇에 적용하기 위해 다음과 같이 보행 알고리즘을 설정한다.

1. 6개의 다리에 대하여 보행법의 특징에 맞게 다리 동작 순서를 정한다.
2. 6개의 다리의 동작을 위한 Time table을 설정한다.

Fig. 4.5은 제안하는 보행 알고리즘을 설명하기 위한 6족 보행 로봇의 시스템 구성도이다.

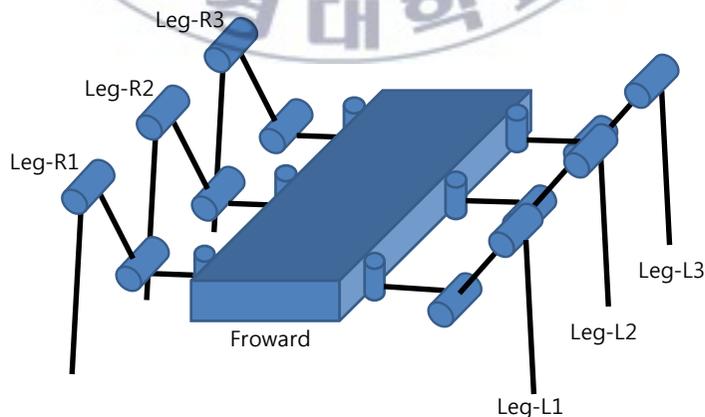


Fig. 4.5 System configuration of Hexapod robot for walking algorithm

3점 접지 보행에서 로봇의 다리는 3개의 다리가 하나의 그룹으로 교차하며 동작한다. Fig. 4.6은 6족 보행 로봇을 위한 3점 접지 보행의 다리 동작 순서이다.

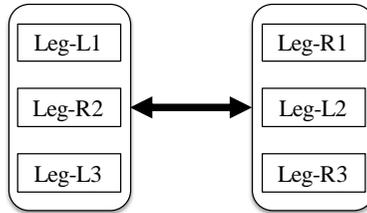


Fig. 4.6 Walking sequence of three point supporting gait

Fig. 4.7은 6족 보행 로봇을 위한 3점 접지 보행의 Time table이다. 보행의 한 주기에 대하여 로봇의 다리는 1/2 시간 동안 부유상태로 움직이고 나머지 시간 동안 몸체를 지지하는 접지상태를 유지하며 이동한다. 로봇은 3개의 다리를 한 그룹으로 이 동작을 수행하며 3점 지지 상태를 유지한다. 여기서 t_l 은 1보행사이클에 걸리는 시간이다.

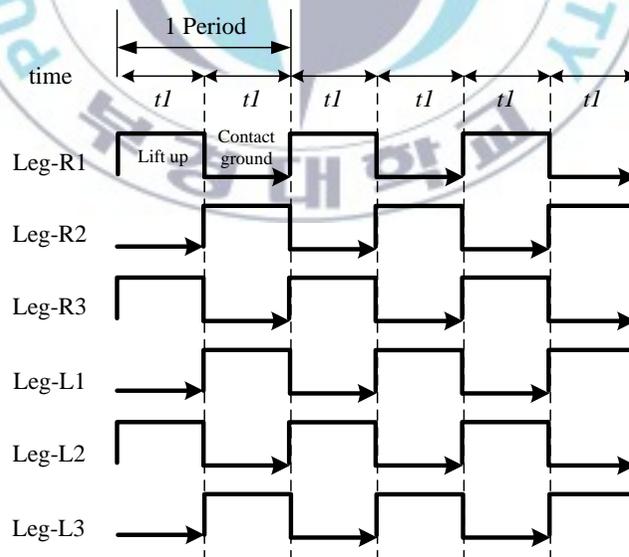


Fig. 4.7 Time table of three point supporting gait for Hexapod robot

Fig. 4.8은 6족 보행 로봇을 위한 5점 접지 보행의 다리 동작 순서이다. 5점 접지 보행에서 로봇의 다리는 앞, 중간, 뒤 순차적으로 좌, 우 번갈아 동작하도록 한다. 이 순서로 인해 같은 위치에 있는(앞, 중간, 뒤 중) 좌우 다리의 동작은 2보행사이클의 일정한 간격을 가지게 되어 보행 시 안정성을 높일 수 있다.

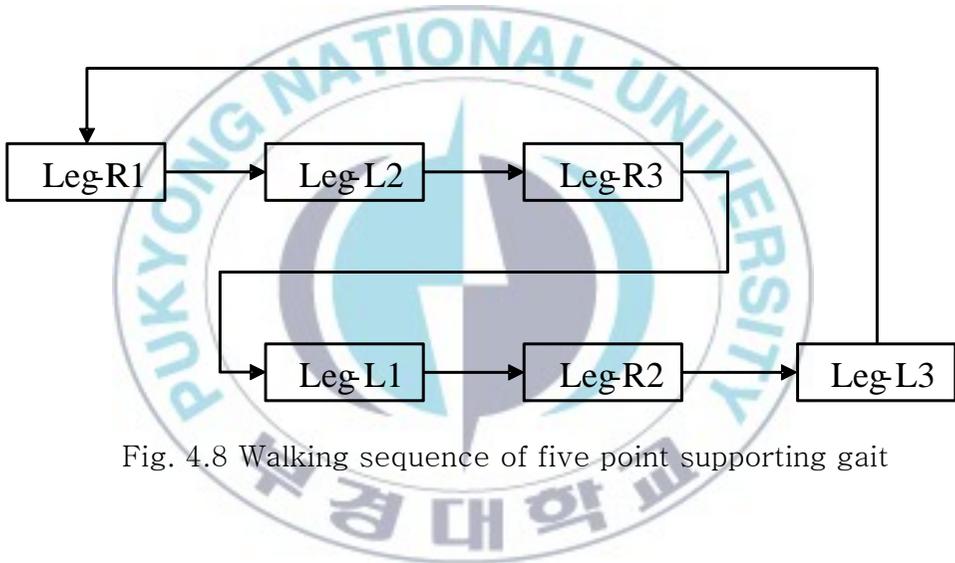


Fig. 4.8 Walking sequence of five point supporting gait

Fig. 4.9은 6족 보행 로봇을 위한 5점 접지 보행의 Time table이다. 보행의 한 주기에 대하여 로봇의 다리는 1/6 시간 동안 부유상태로 움직이고 나머지 시간 동안 몸체를 지지하는 접지상태를 유지하며 이동한다. 로봇은 다리 하나씩 이 동작을 수행하며 5점 지지 상태를 유지한다. 여기서 t_2 은 1 보행사이클에 걸리는 시간이다.

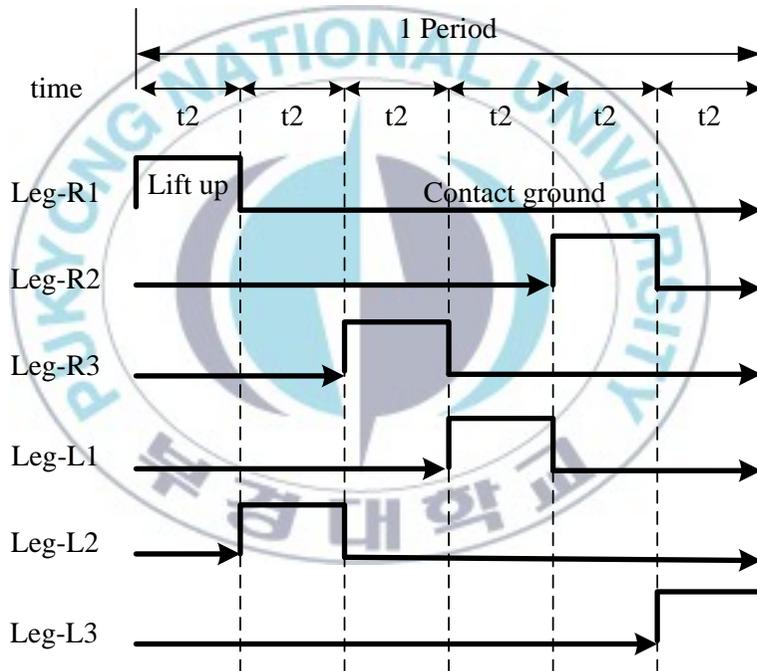


Fig. 4.9 Control rule of five point supporting gait for Hexapod robot

제 5 장 시뮬레이션 및 실험 결과

본 장에서는 3장과 4장에서 제안된 기구학적 모델링과 제어기의 유효성을 입증하기 위해 시뮬레이션을 수행하고 2장에서 시스템을 사용하여 제안한 제어기와 제어 알고리즘을 적용하여 실험한 후 그 결과를 기술한다.

5.1 시뮬레이션

시뮬레이션을 위해 Table 5.1과 같은 초기값과 매개변수 (parameter) 값을 선정한다.

Table 5.1 Initial values and parameter values for simulation

Parameter	Value	Unit
a_1	53	mm
a_2	90	mm
a_3	110	mm
r	40	mm
β	$\frac{3\pi}{4}$	radian
$\theta_{1,0}$	0	radian
$\theta_{2,0}$	$\frac{\pi}{4}$	radian
$\theta_{3,0}$	$-\frac{3\pi}{4}$	radian

5.1.1 시뮬레이션 결과

본 절에서는 제안한 제어기의 유효성을 보여주기 위해 시뮬레이션 결과들을 보인다. Fig. 5.1은 다리의 초기 위치이다. 다리의 이동을 위한 β 와 r 이 결정되면 목표 위치(Desired position)를 계산하고 End effector의 목표 궤적을 생성한다. 이후 제안한 제어기를 적용하여 생성한 목표궤적을 추적한다. 여기서 다리 끝점의 좌표계 (x'_e, y'_e, z'_e)는 End effector의 초기 위치에서 End effector의 현재 위치를 나타낸 좌표이다.

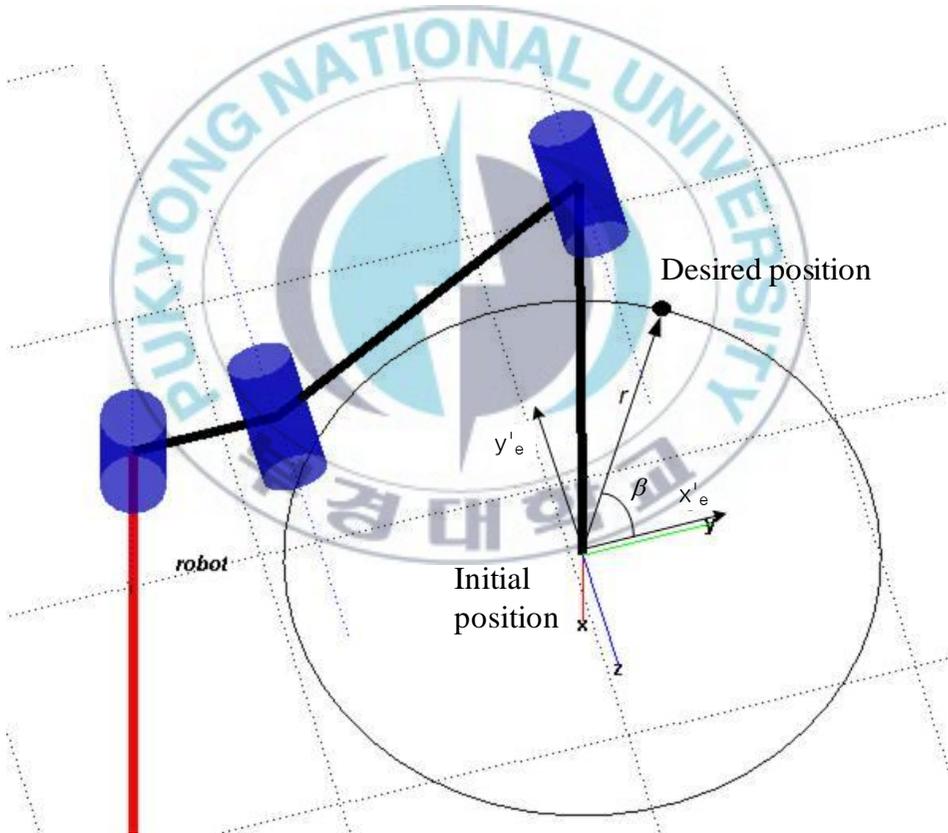


Fig. 5.1 Control simulation of end effector by desired controller

Fig. 5.2는 설정한 초기값과 매개변수를 이용하여 설계된 End effector의 목표 궤적이다. (부록 A 목표궤적 설계)

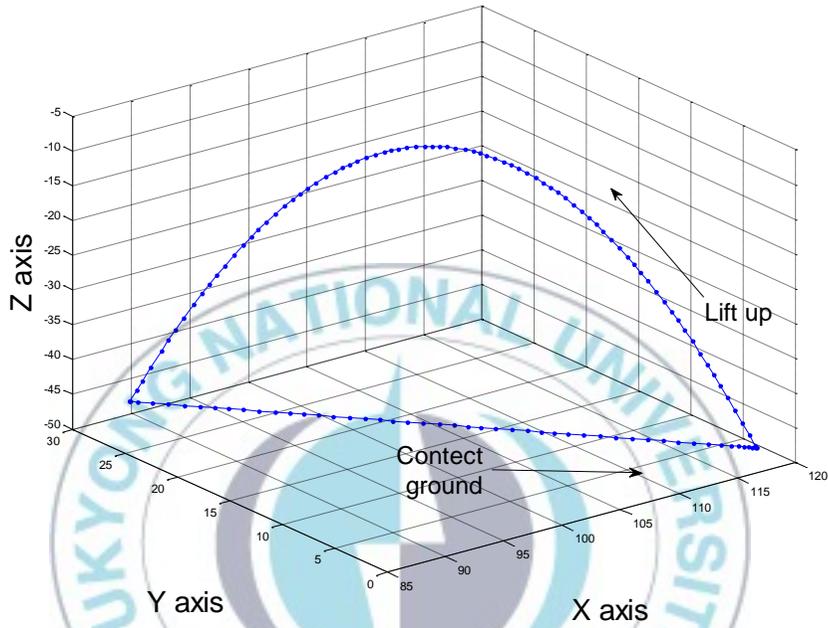


Fig. 5.2 Reference trajectories of end effector

Fig. 5.3은 제안된 제어를 이용하여 한 다리에 대한 End effector의 목표 궤적을 추적한 결과이다. 시뮬레이션 결과는 목표궤적을 잘 추종하는 것을 보여준다.

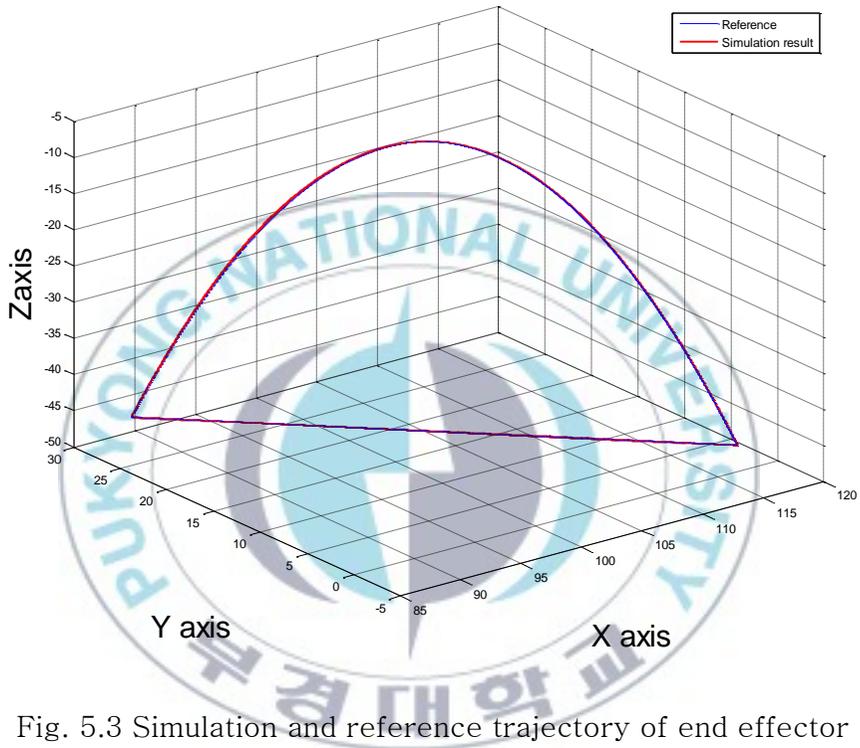


Fig. 5.3 Simulation and reference trajectory of end effector of one leg.

5.1.2 3점 접지 보행

Figs. 5.4는 3점 접지 보행에 있어서 한 다리에 대한 End effector의 목표궤적과 각 축 방향으로의 시뮬레이션 추적 오차 값을 보여준다. X, Y축의 오차는 $\pm 0.3mm$ 의 추적오차 값을 가지며 로봇 다리의 상태가 부유상태 \rightarrow 접지상태 또는 접지상태 \rightarrow 부유상태로 변하게 되면 다리의 진행 방향도 바뀌므로 추적오차 값의 반전됨을 확인할 수 있다. Z축의 오차는 $\pm 1.5mm$ 의 추적오차 값을 가지며 0.5초 부근에서 다리의 Z축 위치가 최고점에 달하면서 추적오차 값이 반전된다. Z축 또한 다리의 진행 방향도 바뀌므로 추적오차 값의 급격한 변화를 볼 수 있으며 접지상태에서는 Z축의 값이 일정하므로 추적오차가 0으로 수렴한다. 전체적으로 1주기로 반복적인 결과를 보여준다.

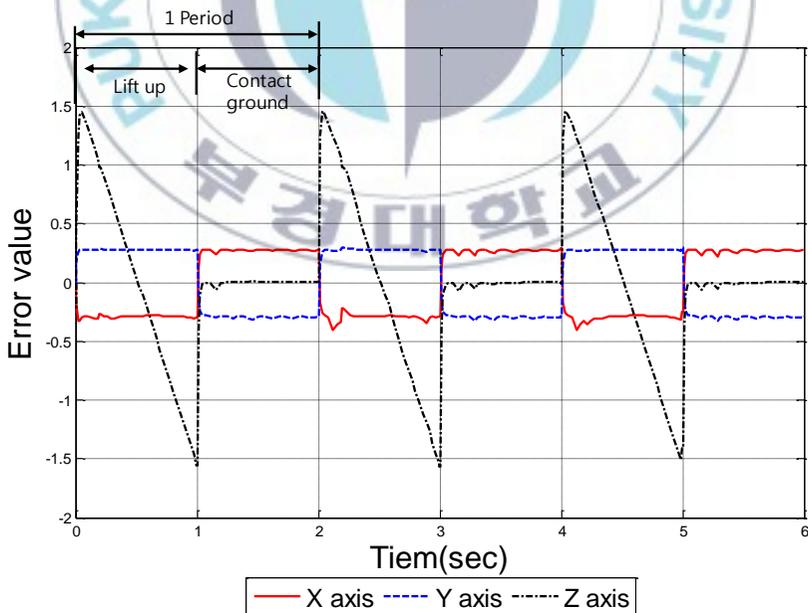


Fig. 5.4 Error value between simulation and reference of end effector of one leg.

5.1절의 한 개의 다리에 대한 시뮬레이션 결과를 바탕으로 3점 접지 보행 시 관절각에 대한 시뮬레이션결과이다. Fig. 5.5은 하나의 다리가 1보행사이클 동안 각 관절의 각도 변화이다. 3점 접지 보행은 2보행사이클을 가지므로 부유상태와 접지상태의 동작시간이 각각 1초로 동일하다.

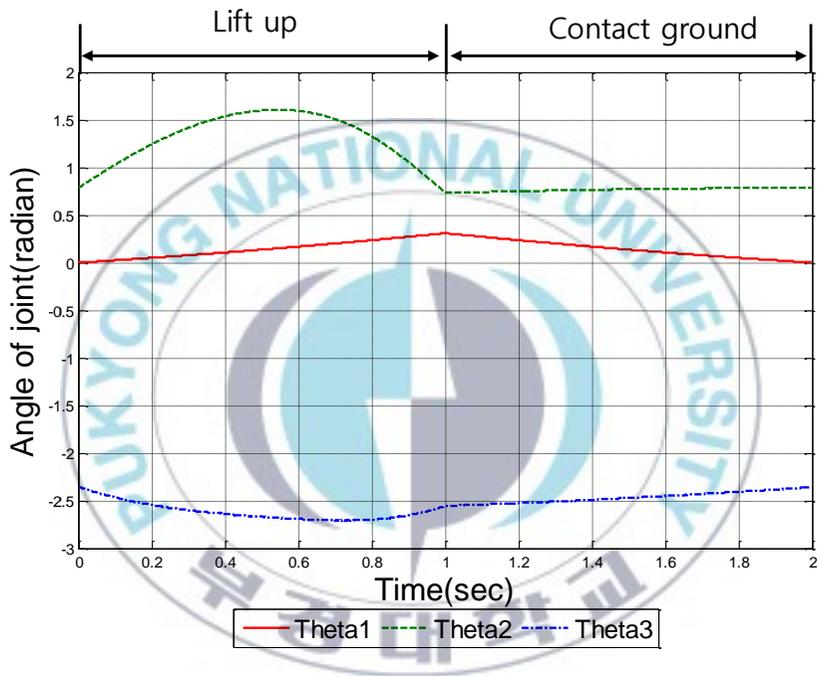


Fig. 5.5 Angle position of three point support gait in 1 walking cycle of one leg

Fig. 5.6은 6개 다리에 3점 접지 보행 알고리즘과 제어를 적용한 시뮬레이션 결과이다. 4.2절에서 제안한 알고리즘과 같은 방식으로 동작함을 볼 수 있다.

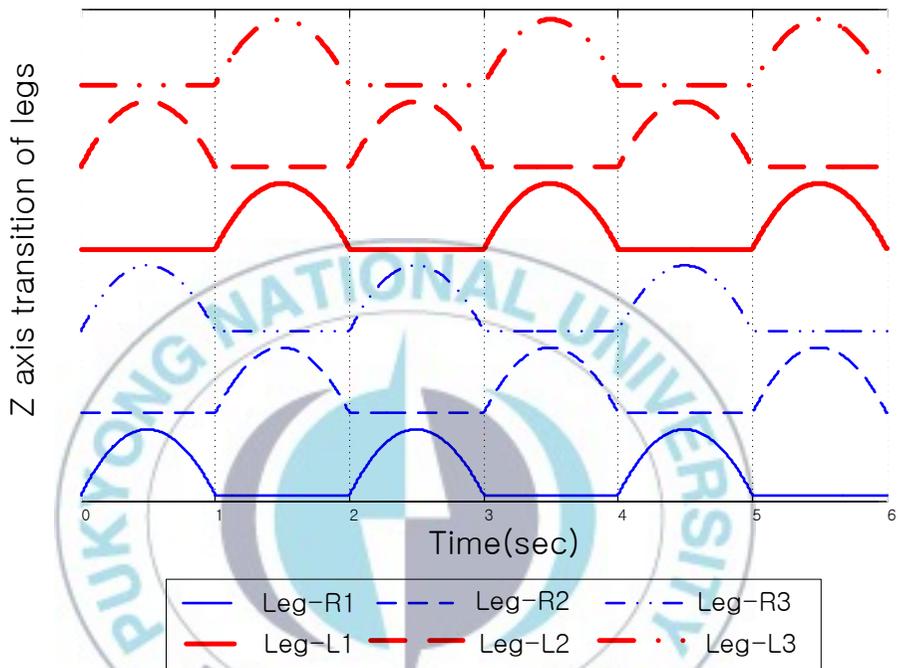


Fig. 5.6 Z axis transition of legs for three point support gait of six leg

5.1.3 5점 접지 보행

5.1절의 한 개의 다리에 대한 시뮬레이션 결과를 바탕으로 5점 접지 보행을 시뮬레이션한다. Fig. 5.7은 하나의 다리가 1 보행 사이클 동안 각 관절의 각도 변화이다. 5점 접지 보행은 6 보행 사이클을 가지므로 부유상태와 접지상태의 동작시간이 각각 0.2초와 1초로 1:5의 비를 가진다.

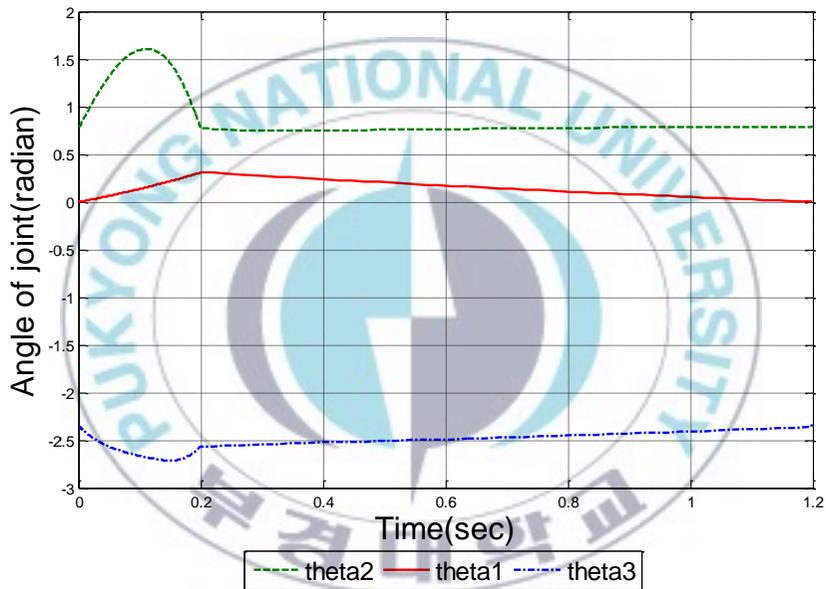


Fig. 5.7 Angle position of five point support gait in 1 walking cycle of one leg

Fig. 5.8은 6개 다리에 5점 접지 보행 알고리즘과 설계된 제어기를 적용한 시뮬레이션 한 결과이다. 4.2절에서 제안한 알고리즘과 같은 방식으로 동작함을 볼 수 있다.

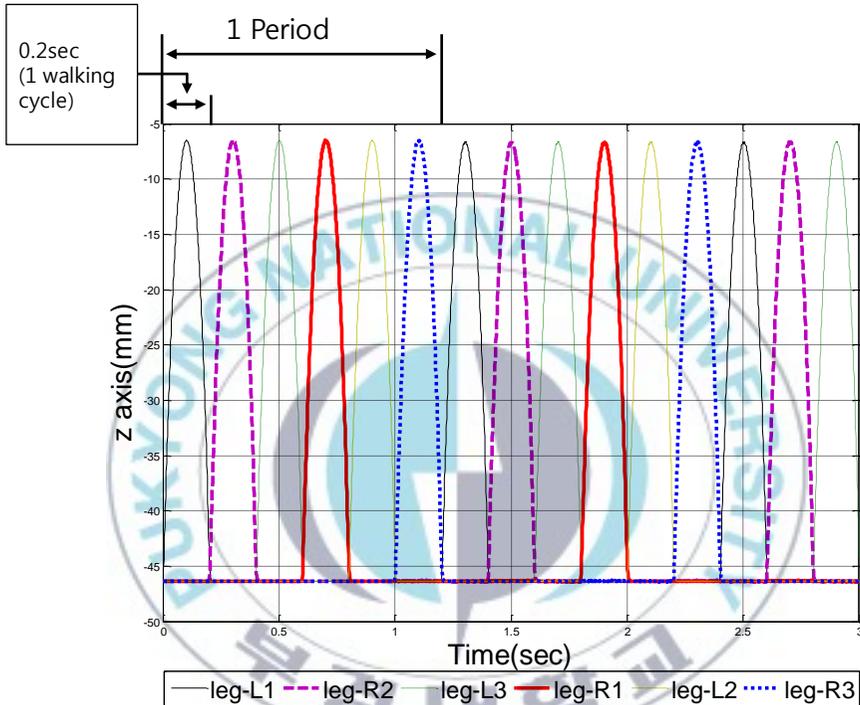


Fig. 5.8 Angle position of five point support gait in 1 walking cycle of one leg

5.2 실험

6축 보행 로봇의 한 다리를 제어하기 위하여 3장에서 제어기를 설계하였고, 실험을 통하여 성능을 검증하였다. 본 장에서는 액추에이터 내부에 포함되어 있는 엔코더(Encoder)를 이용하여 각 관절의 각도를 실시간으로 측정하고 정기구학식을 이용하여 End effector의 위치를 계산하여 그 결과를 시뮬레이션 결과와 비교하여 실제 시스템에 적용한 실험 결과 그래프를 제시한다. 실험은 6개의 다리 중 임의로 하나의 다리를 선정하여 실행하였으며 비교를 위한 보행법은 3점 접지 보행법으로 이를 위한 매개변수는 시뮬레이션의 매개변수와 같다.

Table 5.2 Initial values and parameter values for experiment

Parameter	Value	Unit
a_1	53	mm
a_2	90	mm
a_3	110	mm
r	40	mm
β	$\frac{3\pi}{4}$	radian
$\theta_{1,0}$	0	radian
$\theta_{2,0}$	$\frac{\pi}{4}$	radian
$\theta_{3,0}$	$-\frac{3\pi}{4}$	radian

5.2.1 실험 결과

Fig. 5.9는 하나의 다리를 대상으로 제어기를 적용한 실험 결과로 얻은 End effector의 위치를 시뮬레이션과 비교한 결과이다. 시뮬레이션 결과를 따라 End effector의 궤적이 추적하는 실험 결과가 나타난다.

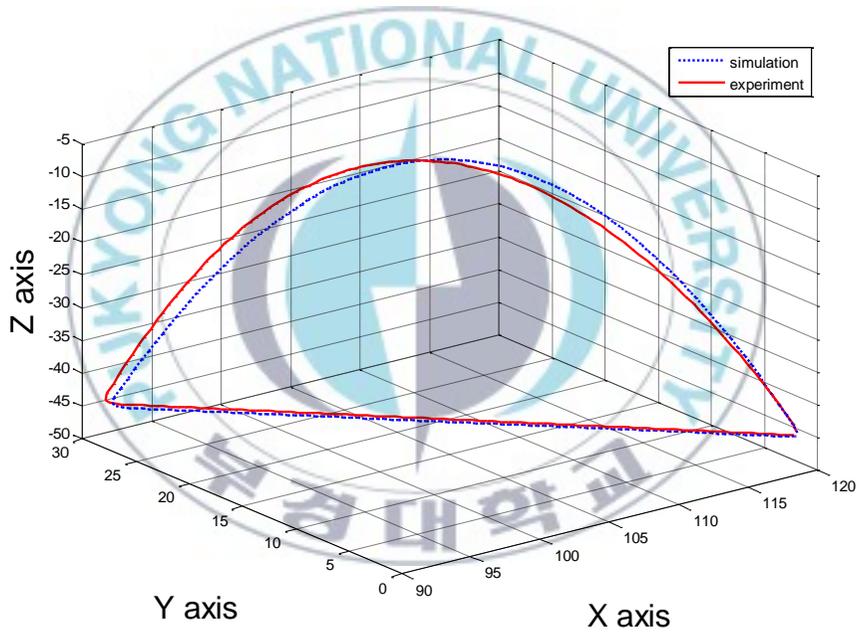


Fig. 5.9 Simulation and experiment trajectory of end effector of one leg.

Figs. 5.10는 3점 접지 보행에 있어서 한 다리에 대한 End effector의 각 축 방향으로의 시뮬레이션과 실험결과의 차이인 추적 오차 값을 보여준다. X, Y축 그리고 Z축의 오차는 부유상태에서 최대 2.3mm의 추적오차가 발생하지만 접지상태에서는 모든 축의 추적 오차가 일정해지거나 0으로 수렴한다.

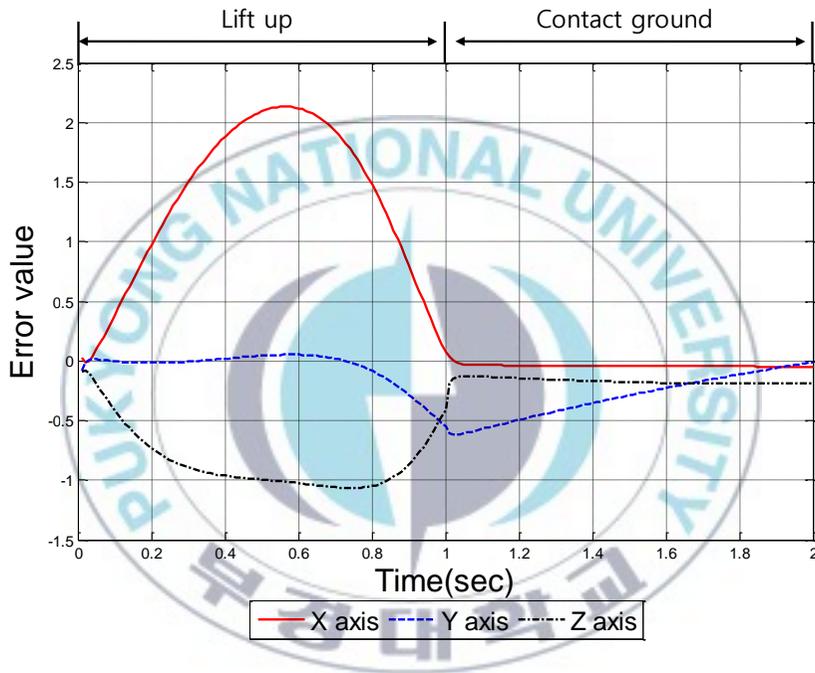


Fig. 5.10 Error value between simulation and experiment of end effector of one leg.

Fig. 5.11은 시뮬레이션과 실험의 각 관절의 각도 변화를 보여준다. 여기서 E theta는 실험의 관절 각도 값이고, S theta는 시뮬레이션의 관절 각도 값이다.

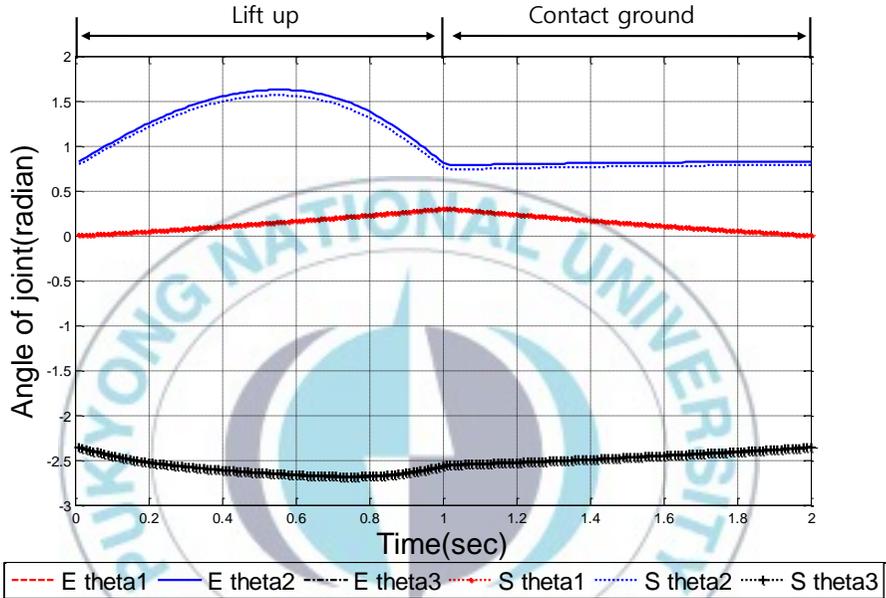


Fig. 5.11 Angle position of simulation and experiment of one leg

Fig. 5.12은 3점 접지 보행의 실험 결과이다. 각 그래프들은 시간에 따른 End effector의 Z 축 위치 변화를 보여준다. 제안한 보행 알고리즘과 같은 다른 동작 순서를 보여주며 이는 시뮬레이션 결과와 동일하다.

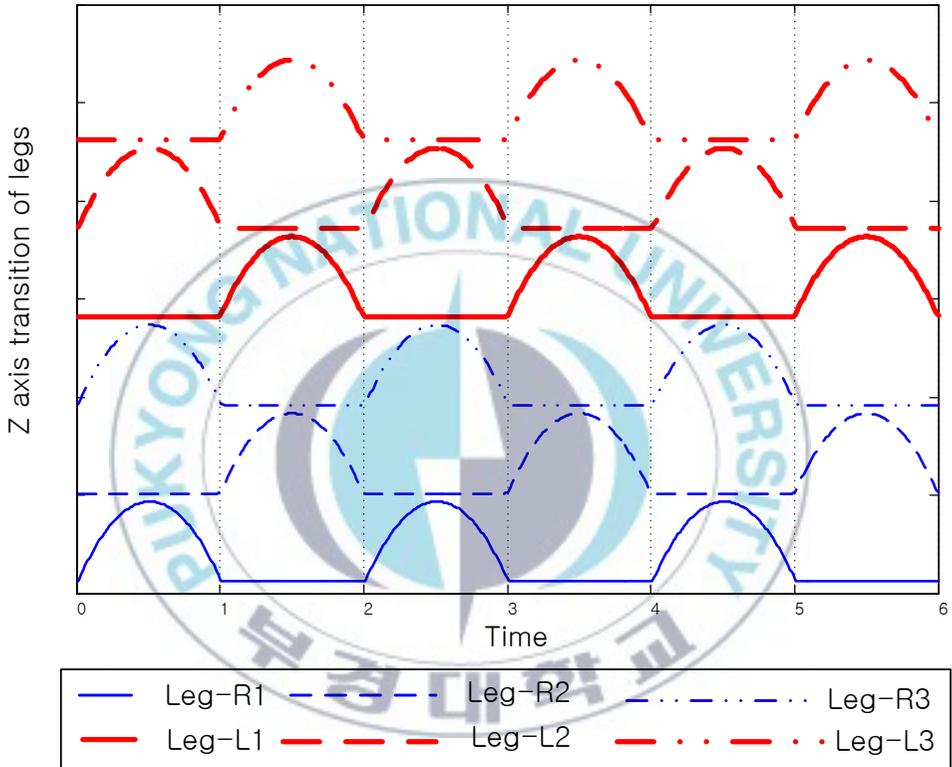


Fig. 5.12 Experiment result of Z axis transition of legs for three point support gait

Fig. 5.13은 5점 접지 보행의 실험 결과이다. 각 그래프들은 시간에 따른 End effector의 Z 축 위치 변화를 보여준다. 제안한 보행 알고리즘과 같은 따른 동작 순서를 보여주지만 실험 결과에서는 End effector의 z축 최고점 위치가 시뮬레이션 결과보다 낮게 나타났다. 현재 6족 보행 로봇의 이동 속도를 4cm/s이므로 로봇의 1 walking cycle의 시간은 0.2초가 된다. 6족 보행 로봇의 전체적인 이동 속도를 줄이고 1 walking cycle에 충분한 동작 시간을 설정한다면 시뮬레이션과 동일한 궤적으로 동작할 수 있다.

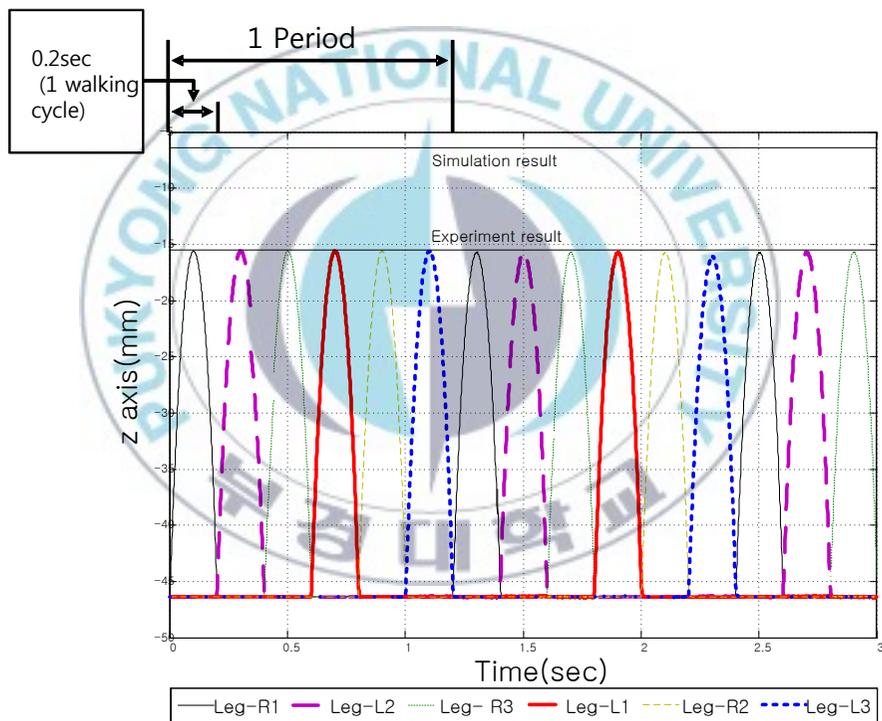


Fig. 5.13 Experiment result of Z axis transition of legs for five point support gait

Fig. 5.14는 3점 접지 보행의 보행 실험 결과이다. 사진의 동그라미 표시는 다리의 부유 상태를 나타낸다. 제안한 보행 알고리즘에 따라 각 다리는 동작하며 그 결과 6족 보행 로봇은 전방으로 이동한다.

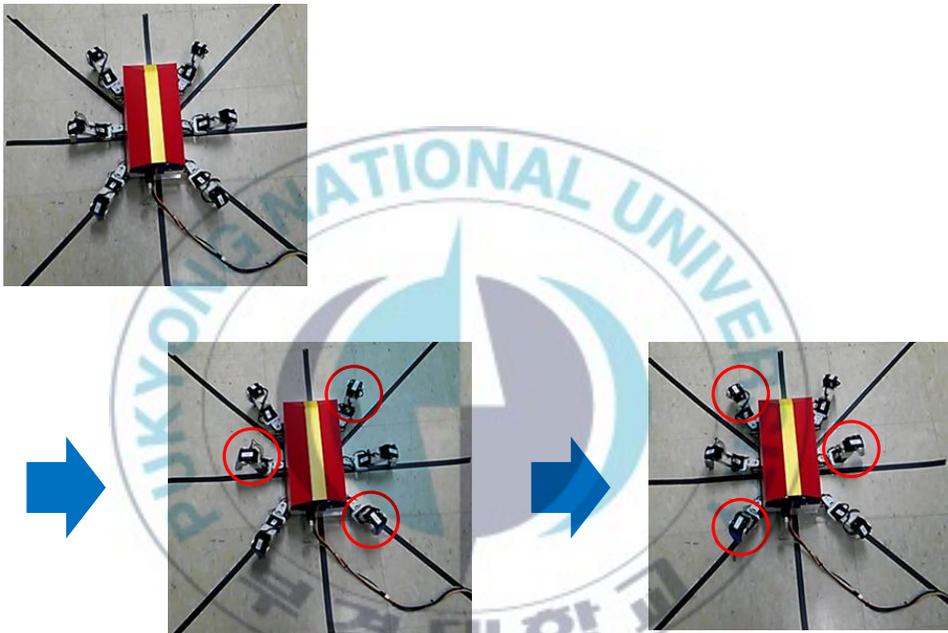


Fig. 5.14 Experiment of hexapod robot for three point support gait

Fig. 5.15는 5점 접지 보행의 보행 실험 결과이다. 사진의 동그라미 표시는 다리의 부유 상태임을 나타낸다. 제안한 보행 알고리즘에 따라 각 다리는 동작하며 그 결과 6족 보행 로봇은 전방으로 이동한다.

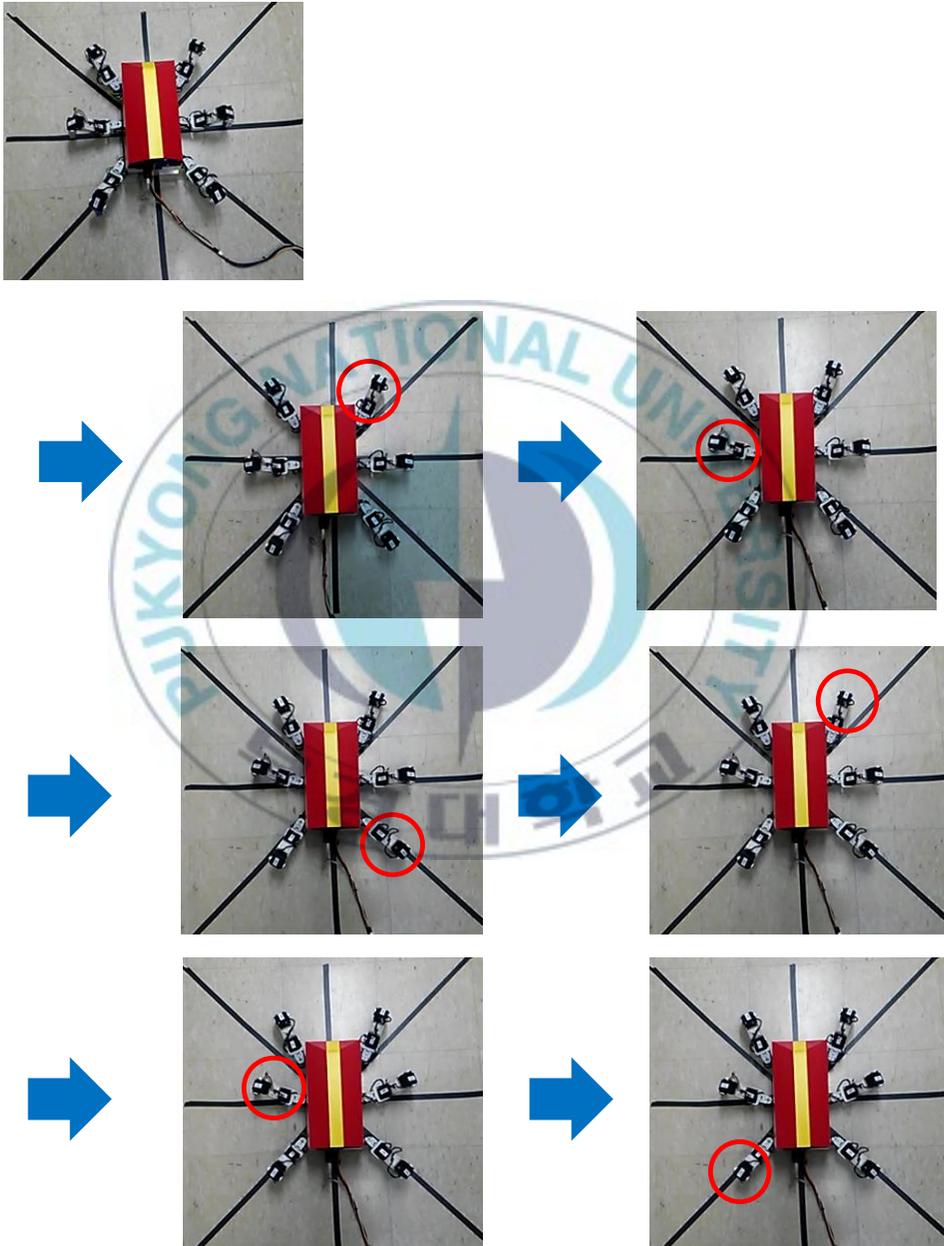


Fig. 5.15 Experiment of hexapod robot for five point support gait

제 6 장 결 론

본 연구에서는 6족 보행 로봇의 전방향 이동 보행을 구현하기 위한 연구를 수행하였으며 그 순서는 다음과 같다. 제 2장에서는 6족 보행 로봇의 제어 시스템을 보였다. 제 3장에서는 역기구학의 단점을 극복하기 위하여 Differential kinematic control을 제안하였다. 이는 정기구학(forward kinematic)을 바탕으로 Lyapunov 안전성을 판별하고 백스텝핑(Backstepping)법을 이용하여 하나의 다리를 대상으로 주어진 다리 끝점의 목표궤적을 추적하는 제어기이다. 제 4장에서는 설계된 제어기를 6개의 다리에 적용하기 위한 보행 알고리즘을 제안하였다. 이는 한 다리를 대상으로 설계된 제어기를 6개의 다리에 적용하기 위한 보행 알고리즘이다. 제 5장에서는 시뮬레이션과 실험을 통하여 제안한 제어기와 보행 알고리즘의 효율성과 적용가능성을 검증하였다. 본 연구의 결론을 요약하면, 다음과 같다.

- 6족 보행 로봇의 한 다리를 대상으로 정기구학을 통해 해석하였다.
- 정기구학을 기반으로 미분기구학을 이용하여 하나의 다리를 대상으로한 제어기를 제안하고 복잡한 역기구학 문제를 해결하였다.
- 미분기구학을 이용하여 한 다리를 제어하기 위한 제어기를 설계하였다.

- 6족 보행 로봇의 6개의 다리를 제어하고 보행의 안정성을 위해 생명체의 걸음새를 관찰하고 이를 기반으로한 보행 알고리즘을 제안하였다.
- 생명체의 걸음새를 모방하여 3점 접지 보행과 5점 접지 보행의 두 가지 보행 알고리즘을 제안하였다.
- 6족 보행 로봇을 제어하기 위해 제어 시스템을 구성하고 6족 보행 로봇을 3D로 설계하였다.
- 제안된 제어기는 시뮬레이션을 통하여 그 유효성을 검증하였다. 설계된 제어기를 통해 End effector의 시뮬레이션 결과는 목표 궤적을 추적하였다. 이때, 부유상태의 추적 오차는 $\pm 1.5mm$ 이고 접지 상태의 추적 오차는 $\pm 0.3mm$ 로 나타났다.
- 6족 보행 로봇을 제작하고 실험을 통하여 제어기의 적용 가능성을 확인하였다. 실험 결과는 시뮬레이션의 결과와 같이 목표 궤적을 추적하였다. 실험과 시뮬레이션 사이의 오차는 부유상태 시 최대 $2.3mm$ 의 추적 오차가 나타나며 접지상태에서는 목표 궤적과 일정한 추적 오차를 가지고 추적하거나 추적 오차가 0으로 수렴하였다.
- 제안된 보행 알고리즘 중 3점 접지 보행과 5점 접지 보행을 구현하였고 시뮬레이션과 실험을 통하여 그 효율성 및 적용 가능성을 검증하였다.

일반적으로 6족 보행 로봇 보다 2족, 4족 보행 로봇에 관한 연구가 많이 진행되어 있고, 6족 보행 로봇의 보행 제어 및 보행 방식에 관한 연구는 다른 보행 로봇과 비교해 미진한 상태이다. 본 연구에서는 6족 보행 로봇의 다양한 보행 방식 중 2가지 보행 방식 알고리즘을 제안하였고 전방향 이동 보행을 구현함으로써 6족 보행 로봇의 다양한

방향의 이동능력을 보였다. 추후 연구 과제로는 불규칙한 지형을 극복하기 위한 6족 보행 로봇의 보행 제어 알고리즘에 대한 연구가 필요하다.



REFERENCES

- [1] Bernhard Klaassen, Ralf Linnemann, Dirk Spennberg, Frank Kirchner, “Biomimetic walking robot scorpion : control and modeling,” Ninth international symposium on intelligent robot system, HD-53754 Sankt Augustin, Germany pp. 69-76, (2002)
- [2] Jeong Woo Park, Nak Soon Choi, Hak Kyeong Kim Tan Tien Nguyen and Sang Bong Kim, “Motion control of animal type hybrid quadruped,” International Symposium on Mechatronics and Robots, HCMUT, Vietnam, (2007), pp. 10-14.
- [3] Josef Schmitz, Jeffrey Dean, Thomas Kindermann, Michael Schumm and Holk Cruse, “A biologically inspired controller for hexapod walking : simple solutions by exploiting physical properties”, Biol bull pp. 195-200, (2001).
- [4] 양정민, 김종환, “육각보행로봇의 내고장 계절음새 주행”, 대한전자공학회 학술 발표회, (1997).

- [5] 이상훈, 김진걸, “복잡한 지형에 유연하게 적응할 수 있는 변형 가능한 6족 로봇의 구현”, 대한전기학회, (2006).
- [6] Mustaja Suphi Erden and Kemal Ledlebicioglu, “Torque distribution in a six-legged robot”, IEEE transactions on robotics, Vol. 23, No. 1, pp. 179-186, (2007).
- [7] D. C. Kar, K. Kurien Issac, K. Jayarajan, “Minimum energy force distribution for a walking robot”, Journal of robotic system, Vol. 18, No. 2, pp. 47-54, (2001).
- [8] 양정민, “자율 보행 로봇을 위한 내고장성 제어”, Journal of control, automation and systems engineering, Vol. 9, No. 11, pp. 943-951, (2003).
- [9] 양정민,곽성우, “평판 발을 가지는 사족 보행 로봇의 내고장성 걸음새”, Journal of institute of control, robotic, and system”, Vol. 18, No. 2, pp. 141-148, (2012).
- [10] Xuedong Chen, Keigo Watanabe, Kazuo Kiguchi and Kiyotaka Izumi, “A real-time kinematics on the translational crawl motion of a quadruped robot”,

Journal of intelligent and robot system, Vol. 29, pp. 111-131, (2000).

- [11] Xuedong Chen, Keigo Watanabe, Kazuo Kiguchi and Kiyotaka Izumi, "Optimal force edistribution for the legs of a quadruped robot", Machine intelligence & robotic control, Vol. 1, No. 2, pp. 87-94, (1999).
- [12] P. K. Pal and Jayarjan K, "A free gait for generalized motion", Robotics and automation, IEEE Transaction on, Vol. 6, No. 5, pp. 597-600, (1990).
- [13] 안영명, "비평탄 지형에서 스토르크 제어법을 이용한 4족 로봇의 보행 알고리즘에 관한 연구", 전자공학회, 제 43권, 제 4호, pp. 52-59, (2006).
- [14] 이수영, 최대성, 최병욱, "4족 애완로봇을 위한 보행 운동 계획", 제어 로봇 시스템학회, 제 15권, 제 6호, pp. 626-633, (2009).
- [15] Joaquin Estremera and Pablo Gonzalez ds Santos, "Free gaits for quadruped robots over irregular terrain", The international journal of robotics research, pp. 115-130, (2002).

- [16] J. E. Vargas, “Control system of a quadruped walking robot”, Instrumentation and development, Vol. 3, No. 4, pp. 59-63, (1994).
- [17] 엄한성, “4족 보행 로봇의 자세각 제어에 관한 연구”, 한국해양정보통신학회, 제 9권, 제 8호, pp. 1722-1729. (2005).
- [18] Joao Pedro Barreto, A. Trigo, P. Menezes, J. Dias, and A. T. de Almeida, “FED – The free body diagram method kinematic and dynamic modeling of a six leg robot,” 5th International Workshop on Advanced Motion Control(AMC) , pp. 423-428, (1998).
- [19] Robert. B. Mcghee and Geoffrey. I. Iswandhi, “Adaptive locomotion of a multilegged robot over rough terrain”, IEEE Transactions on systems, man, and cybernetics, Vol. SMC-9, No. 4 (1979).
- [20] Jung Min Yang, “Omnidirectional walking of legged robots with a failed leg”, Mathematical and computer modelling 47, pp. 1372-1388, (2008),
- [21] Makoto Kaneko, Kazuo Tanie and Mohamad nor mohamad than, “A control algorithm for hexapod walking machine over soft ground”, IEEE journal of

robotics and automation, Vol. 4, No. 3, pp294-302 (1988).

[22] Manuel F. Silva, J. A. Tenreiro Machado, Ramiro S. Barbosa, “Complex-order dynamics in hexapod locomotion”, Signal processing, Vol. 86, Issue. 10, pp. 2785-2793, (2006).

[23] J. M. Porta and E. Celaya, “Reactive free-gait generation to follow arbitrary trajectories with a hexapod robot”, Robotic and autonomous system, Vol. 47, Issue. 4, pp. 187-201, (2004).

[24] Md. Masum Billah, Mohiuddin Ahmed and Soheli Farhana, “Walking hexapod robot in disaster recovery : developing algorithm for terrain negotiation and navigation”, World academy of science, engineering and technology, (2008).

[25] 강동현, 민영봉, M. Iida, M. Umeda, “6족 보행 로봇에 관한 기초 연구”, 한국농업기계학회, pp. 373-376, (2007).

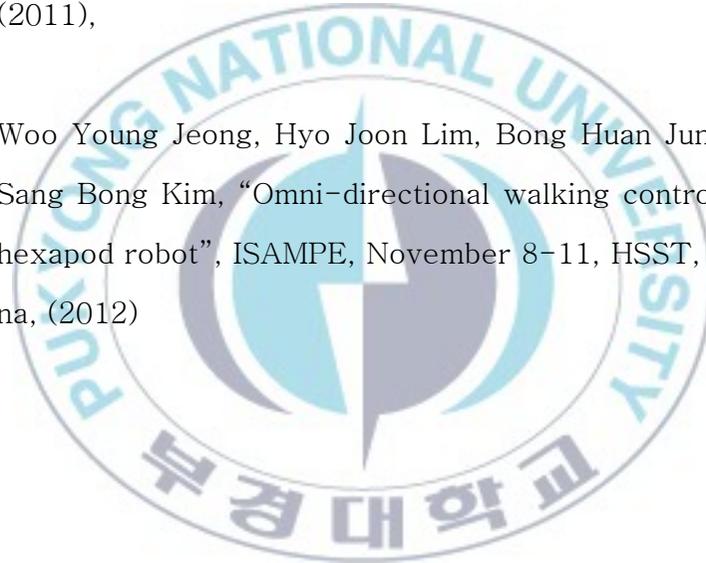
[26] Y. S. Zhao, Ling Lu, T. S. Zhao, Y. H. Du and Z. Huang, “Dynamic performance analysis of six-legged walking machines”, Mechanism and machine

theory, Vol. 35, Issue. 1, pp. 155-163, (2000).

- [27] 김병호, “다족 로봇을 위한 효과적인 보행 패턴 분석”, 한국지능시스템학회, Vol. 9, No. 5, pp. 622-628, (2009).
- [28] Marcin Piatek and Dariusz Marchwka, “Walking robot modeling aspects,” the 1st International Conference on Robotics in Education, pp. 16-17, (1979).
- [29] Tsu-Tian Lee, Ching-Ming Liao and Tign-Kou Chen, “On the stability Properties of Hexapod Tripod Gait,” IEEE Journal of Robotics and Automation, Vol. 4, No. 4 (1988).
- [30] Shugen Ma, Takashi Tomiyama and Hideyuki Wada, “Omnidirectional static walking of a quadruped robot”, IEEE Transaction on robotics, Vol. 21, No. 2, pp. 152-161, (2005).
- [31] Bruno Siciliano, Lorenzo Sciavicco, Luigivillani and Giuseppe Oriolo, “Robotics : modeling, planning and control”, Springer

Publications and Conferences

- [1] Woo Young Jeong, Jeong Geun Kim, Hak Kyeong Kim and Sang Bong Kim, “Study on walking motion control of hexapod robot,” International Symposium on Mechatronics and Robots, HCMUT, Vietnam, pp. 163-168, (2011),
- [2] Woo Young Jeong, Hyo Joon Lim, Bong Huan Jun and Sang Bong Kim, “Omni-directional walking control for hexapod robot”, ISAMPE, November 8-11, HSST, China, (2012)



부 록

부록 A

제 5장 목표궤적 설계

제안한 제어기의 추적 제어 대상인 목표궤적은 다음과 같이 설계된다. Fig. A.1은 목표궤적을 나타낸 그림이다. 여기서 z_h 는 부유 상태(Lift up state)에서 다리의 최고점이며 다리는 $r/2$ 의 위치에서 최고점에 도달한다.

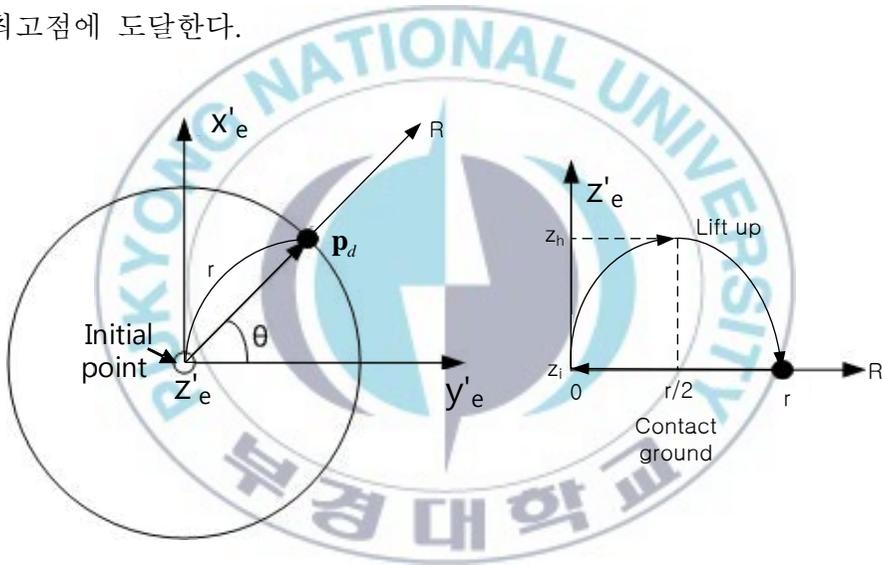


Fig. A.1 Design of reference trajectory

목표 궤적은 다리의 동작 상태에 따라 2가지 방식으로 설계된다.

➤ 부유상태(Lift up state)

부유상태는 초기위치 (z_i)에서 목표위치로 다리는 움직이는 동작이다. 그러므로 x'_e 와 y'_e 축에 대해 시간에 따른 목표궤적은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$x_{reference}(t) = \frac{r \sin \beta}{t_{lift\ up}} t + x_i \quad (A.1)$$

$$y_{reference}(t) = \frac{r \cos \beta}{t_{lift\ up}} t + y_i \quad (A.2)$$

여기서 $t_{lift\ up}$ 는 다리의 부유상태를 유지하는 시간이며 t 는 동작시간이다. 동작시간 t 가 부유상태를 유지하는 시간 $t_{lift\ up}$ 과 같을 때 ($t = t_{lift\ up}$), 다리는 목표 위치에 도착하고 부유상태에서 접지상태로 전환된다. r 은 End effector의 초기 위치에서 목표 위치까지의 직선 거리이고, (x_i, y_i, z_i) 는 End effector의 초기위치이다. End effector는 시간에 따라 부유상태로 r 의 직선 위로 동작하므로 시간에 따른 End effector의 부유상태 높이 ($z_{reference}$) 는 초기위치와 목표위치를 지나는 2차 방정식으로 나타낼 수 있다. 본 연구에서는 z_i 는 40mm로, r 은 40mm로 선정하였으며, End effector의 초기 위치는 (118.76, 0, -44.36)으로 정기구학식으로 구할 수 있다. 그러므로 z 축의 궤적은 다음과 같다.

$$z_{reference}(t) = -0.1R^2(t) + 4R(t) - 44.24 \quad (A.3)$$

여기서 $R(t)$ 는 식 (A.1)과 (A.2)로 나타내어지는 직선 r 위에서의 시간에 따른 End effector의 위치이며 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$R(t) = \sqrt{(x_{reference}(t))^2 + (y_{reference}(t))^2}$$

➤ 접지상태(Contact ground state)

접지상태는 목표 위치에서 초기위치로 물체를 지지하면서 이동하는 동작이다. x, y 축에 대해 시간에 따른 목표 궤적은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$x_{reference}(t) = -\frac{r \sin \beta}{t_{contact}} t + x_d \quad (A.4)$$

$$y_{reference}(t) = -\frac{r \cos \beta}{t_{contact}} t + y_d \quad (A.5)$$

여기서 $t_{contact}$ 는 다리의 접지상태를 유지하는 시간, t 는 동작시간이고, (x_d, y_d, z_d) 는 End effector의 목표 위치 좌표이다. 동작시간 t 가 접지상태를 유지하는 시간 $t_{contact}$ 과 같을 때 ($t = t_{contact}$) 다리는 초기위치에 도착하고 접지상태에서 부유상태로 전환된다. End effector는 시간에 따라 접지상태로 r 의 직선을 따라 동작하므로 시간에 따른 End effector의 부유상태 높이 ($z_{reference}$) 는 일정하다. 그러므로 z 축의 궤적은 다음과 같다.

$$z_{reference}(t) = z_i \quad (A.6)$$

감사의 글

본 논문이 완성되기까지 항상 아낌없는 격려와 지도로 학문과 인생의 바른길을 보여주신 김상봉 지도 교수님께 진심으로 머리 숙여 감사 드리며, 베풀어 주신 은혜와 가르침을 항상 기억하고 나누며 살겠습니다. 논문 심사 과정에서 질책과 조언을 아끼지 않으셨던 이일영 교수님과 최연욱 교수님께 다시 한번 감사 드립니다. 수업에서 인상적인 가르침을 전해주셨던 교수님들과 많은 것들을 보여주고 이끌어주셨던 CIMEC 연구실 선배님들께 감사드립니다. 그리고 본 연구를 할 수 있게 많은 부분을 도와 주신 해양 연구원의 전봉환 박사님께도 감사드립니다.

항상 웃음과 사랑으로 연구실에서나 MT 에서 당신의 또 다른 자식들처럼 연구실원들을 보듬어 주시던 사모님께도 지면을 통해서나마 감사드립니다. 그리고 항상 연구에서 조언을 아끼지 않으신 김학경 교수님께 감사드리고 아는 것 없던 학부시절 기꺼이 연구에 참여하도록 해주시고 많은 것들을 가르쳐주신, 임재성 선배님, 최낙순 선배님, 이도경 선배님, 김대원 선배님께 감사드립니다. 또한 졸업하신 후에서도 꾸준히 연구실을 찾아주시고 후배들을 격려해주신 김석렬 선배님, 신승목 선배님, 정상권 선배님, 윤석민 선배님께 감사드립니다. 박사과정을 마치고 고국으로 귀국하신 Nguyen Hung 박사님과 Dinh Viet Tuan 박사님께도 감사드립니다.

처음 들어와서부터 많은 관심을 주시고 보살피 주신 이경목 선배님, 과제에 책임감을 가지시고 누구보다 열심히 하시는 모습을 보여주신 박철한 선배님, 항상 관심있게 지켜봐 주신 김대환 선배님, 학부 때부터 늘 함께 지내면서 많은 것을 가르쳐주신 김서광 선배님,

선배지만 동기나 친구처럼 편안하게 대해준 박유미 선배님께 감사드리고 앞날에는 영광만이 있으시길 바랍니다. 누구보다 가깝게 지내고 많은 도움을 준 나의 동기 배민지양에게 감사드리고 앞으로도 많은 발전이 있기를 기원합니다. 그리고 석사로 늦게 연구실에 들어왔지만 누구보다 책임감있게 자신의 역할을 수행해 주신 김정근 후배님, 학부생부터 과제를 책임감 있게 수행해준 김진욱 후배님, 항상 열심히 모습이 보기 좋은 임효준 후배님, 앞으로 많은 것을 배워나갈 강지수 후배님, 연구실에서 과제와 공부를 함께 해온 외국인 Doan Phuc Thinh, Hoang Giang, Pandu Sandi Pratama, Patil chetanraj Dharamdas 그리고 지금은 없지만 연구실에서 인연을 맺었던 많은 분들께도 감사드립니다.

부족한 저를 항상 묵묵히 지켜봐 주시고 그저 착한 아들이라 고만 믿어주시는 아버지, 어머니께 진심으로 고개 숙여 감사드립니다. 해준 것도 없는데 신경 써주고 힘이 되어 준 형 정우현과 항상 옆에서 저를 믿어주고 응원해준 동생 정우제에게도 감사하는 마음을 전합니다. 마지막으로 항상 저를 걱정해주시고 사랑해주시는 모든 분들께 멀리서나마 행복을 빕니다.

2013년 3월

정우영