

이족 보행 로봇의 설계 및 정적 보행 제어에 관한 연구

김대성, 장시영, 김홍록, 서일홍
 한양대학교 전자전기제어계측공학과

(+82-31-408-5802; FAX: 82-31-408-5803; E-mail:ihsuh@hanyang.ac.kr)

Design of Biped Robot and Static Walking Control

Dae Sung Kim, Si Young Jang, Hong Rok Kim, Il-Hong Suh
 School of Engineering and Computer Science, Hanyang Univ.

(+82-31-408-5802; FAX: 82-31-408-5803; E-mail:ihsuh@hanyang.ac.kr)

Abstract - 최근 휴머노이드 로봇 기술의 발전으로 로봇 관련 기반 기술 및 주변 기술의 연구가 활성화되고 있다. 이러한 연구의 하나로 이족 보행 로봇의 보행 알고리즘의 개발이 국내외에서 진행되고 있다. 이족 보행 로봇의 핵심 기술은 로봇의 기구 설계와 보행 제어 알고리즘에 있다. 보행 제어 알고리즘에 있어서는 보행시 로봇의 각 관절에 대한 계적을 생성하는 방법과 관절의 부하를 최소화하는 힘 제어 방법 등의 알고리즘들이 연구되고 있다. 본 논문에서는 자체 제작한 12자유도를 갖는 이족 보행 로봇의 안정적인 보행 제어를 수행하는 알고리즘을 제안하였다. 그리고, 다양한 보행 패턴에 대한 실험을 통해 제안한 알고리즘의 유용성을 검증하였다.

1. 서 론

이동 로봇은 인간을 대신하여 위험한 환경에서 작업을 할 수 있도록 개발되어졌다. 이러한 로봇은 이동을 하기 위해 바퀴나 트랙 등이 주로 사용되었다. 실제 바퀴로 이동하는 로봇은 정적으로 안정되어 있고, 빠른 속도로 이동이 가능한 장점이 있다. 하지만 습지나 사막지대와 같은 불규칙한 환경에서는 이동에 한계가 있기 때문에 기술적, 경제적인 어려움에도 불구하고 1970년대부터 인간과 흡사한 이족 보행 로봇의 연구가 진행되어져 왔다. 보행 로봇은 험난한 환경에서 인간을 대신하여 작업을 할 수 있는 로봇으로서 여러 분야에서 연구되어지고 있다. 이족 보행 로봇을 구현하기 위한 가장 중요한 관점은 보행 기술에 있다.

이족 보행 로봇의 보행 방식은 크게 정적 보행과 동적 보행으로 구분된다. 정적 보행은 로봇의 중심 이동이 작고 속도가 느린 보행 방법이고, 동적 보행은 직진시 중심의 위치가 발에서 떠나 스스로 균형을 깨고 앞으로 넘어지듯이 걷는 보행 방법이다. 인간의 보행 형태는 동적 보행과 흡사하다. 동적인 보행을 수행하는 로봇의 구현에 있어서 동적인 평형을 유지하도록 충분히 빠른 속도로 제어해야 하며 동력학적 해석과 안정성의 판단이 정적 보행 보다 상대적으로 까다롭다. 따라서 동적 보행을 구현하기에 앞서 정적 보행에 관해 연구를 시작하였다.

휠이나 체인 등의 정적으로 안정화된 다리를 지닌 이동 로봇의 경우 무게 중심이 지지영역 내에 있다. 하지만 정적으로 불안정한 이족 로봇의 경우 무게 중심의 위치가 중요한 변수로 작용한다. 정적 보행에 있어서는 실제 로봇의 보행시 로봇 발의 착지점에서 다른 발의 이동시에 약간의 시간을 두어 이동 다리가 바뀔 때의 안정성을 로봇의 무게 중심에 두고 발과 발의 이동시에 충분한 시간을 확보함으로써 원활한 보행을 하고자 한다. 로봇의 정적 보행 실험을 위해 정의한 보행의 종류는 직진, 후진, 좌우 이동에 대한 실험을 하였으며 그에 대한 각각의 보행에 대해 시뮬레이션을 거쳐 출력된 결과를 실제 로봇에 적용하여 실험하였다.

2. 본 론

2.1 이족 보행 로봇의 기구부 설계

본 연구를 위해 제작된 이족 보행 로봇의 기구부는 보행시 필요한 최소의 관절로 설계하였으며, 한쪽 다리에 대해 6개의 조인트(허리-3, 무릎-1, 발목-2)로 구성하여 전체 12자유도를 갖는 이족 로봇이다. 설계시 로봇의 전체적인 하중을 고려하여 frame의 재질은 뛰어난 기계적 강도와 일반 금속보다 1/7정도 가벼운 경량 합성 수지인 M.C(Monomer Cast) 나일론과 알루미늄을 이용하였다. 로봇의 전체 외형은 그림 2.1과 같으며 전체 무게는 1.23kg 이다.

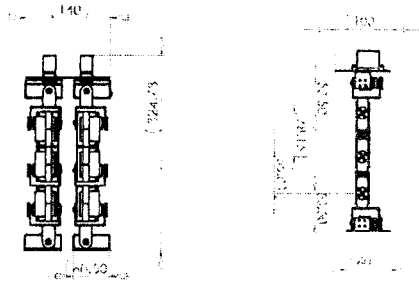


그림 2.1 로봇의 기구부

2.2 로봇의 좌표계 설정 및 기구학 해석

전체 시스템의 좌표계는 그림 2.2 에서와 같이 개형 구조로 모델링하였으며 로봇의 기준 좌표를 허리 부위에 두고 말단 장치를 발바닥 부분으로 정하였다. 로봇의 기구학은 한쪽 다리에 대해서 구하고 다른 쪽 다리에도 똑같이 적용하였다. 좌표계는 강체의 링크 사이의 관계를 표시하는 D-H(Denavit-Hartenberg) 표기법을 사용하였다.

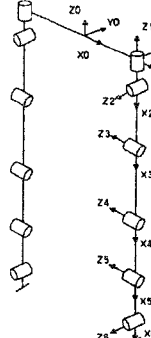


그림 2.2 로봇의 좌표계

2.2.1 기구학

로봇의 기구학을 구하기 위해 우선 그림 2.2에서 표기한 D-H 표기법에 대하여 각 프레임들간의 상대적인 좌표변환관계를 나타내는 D-H Table를 작성하여 기준 좌표계에 대한 end-effector의 좌표를 식 2.2.1와 같이 변환 행렬의 연산을 통해 구한다.

$${}^0T_6 = {}^0A_1 A_2 \dots A_6 \quad (2.2.1)$$

변환 행렬을 통해 구해진 기준 좌표계에 대한 말단장치 의 위치는 식 2.2.2와 같이 3 by 1 행렬로 구해진다.

$$\begin{aligned} x &= f_x(\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5, \theta_6), \\ y &= f_y(\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5, \theta_6), \quad ; \quad X = F(\theta). \quad (2.2.2) \\ z &= f_z(\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5, \theta_6). \end{aligned}$$

2.2.2 역기구학

주어진 Cartesian coordinate로부터 각 조인트의 변수를 유도하기 위해서 역기구학을 구한다. 위에서 구한 위치 벡터를 편미분을 취하여 자코비안 행렬을 구했으며 역기구학을 풀기 위해서 자코비안 행렬을 식 2.2.3과 같이 의사역자코비안(Pseudo-Inverse Jacobian)을 취하여 구하였다.

$$\begin{aligned} \delta X &= J \delta \theta. \quad (X : \text{position vector}, \theta : \text{angular vector}) \\ \delta \theta &= J^+ \delta X \quad (J^+ = J^T (J J^T)^{-1}). \quad (2.2.3) \end{aligned}$$

2.3 로봇의 궤적 계획

로봇의 전체 움직임은 발끝에 대한 Cartesian space에서의 경로로 이루어지며 보행시 부드러운 움직임과 기계적 충격량까지 고려할 수 있는 시간에 대한 경로의 5차 다항식 곡선으로 설정하였다. 정적 보행을 위해서는 로봇의 무게 중심이 발이 접지하고 있는 지지영역 내에 존재하도록 양 발끝의 경로를 계획하고 정해진 궤적에 대한 Cartesian trajectory에 의해 시간에 대한 위치의 변화량을 의사역자코비안 연산을 통해 각도의 변화량을 얻는다. 이 때 의사역자코비안에 의해 얻어지는 발목의 각도가 착지 시 지면에 대해 틀어진 상태로 출력되는 현상이 발생한다. 따라서 보행 시 원하는 형태의 자세를 얻기 위해 발목 조인트에 지면과 평행하도록 구속조건을 부여하였다. 식 2.3을 이용하여 해당 조인트에 대한 자세 보정을 수행하였다.

$$\Delta \theta(t) = J^+ (\Delta X(t) + E(t)) \quad (2.3)$$

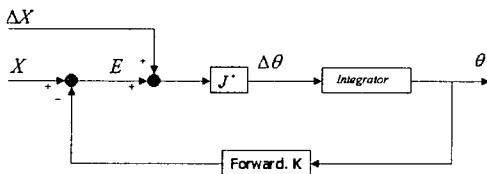


그림 2.3 Closed-loop Motion control

2.4 실험 환경

정적 보행을 위한 전체적인 실험과정은 실제 로봇에 대한 3차원 시뮬레이션을 거쳐 얻어진 보행에 대한 결과를 실제 제작된 로봇에 적용하여 실험하였다. 본 연구에서 사용한 이족 보행 로봇은 높이 324.78mm, 무게 1.23kg이며, actuator로는 RC Servo motor를 썼으며, 제어기로는 Arm7 processor를 사용하였다.

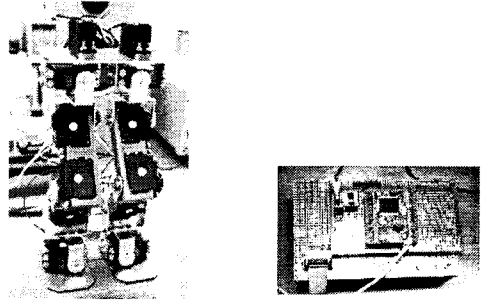


그림 2.4 이족 보행 로봇과 제어기

2.4.1 모의 실험

이족 보행 로봇의 모의 실험은 그림 2.4.1에서와 같이 3차원 그래픽 뷰어로 구현되었다. 시뮬레이터의 기능은 로봇의 기구학과 역기구학에 대한 모션 제어가 가능하고, 적용된 알고리즘에 대한 모의 실험이 가능하다. 시뮬레이터는 미리 계획된 궤적에 대한 로봇의 보행을 입체적으로 실험이 가능하며, 그 결과로부터 출력된 조인트 각도를 이족 보행 로봇에 입력하여 실제 로봇에서의 실험이 가능하다.

모의 실험을 위해 정의된 보행의 종류는 직진, 후진, 그리고, 좌우 이동에 대해 실험하였다. 각각의 보행에 대하여 각 조인트의 각도를 계산해 내고, 실제 로봇의 무게 중심이 지지면 내에 존재하도록 로봇의 허리와 발목에 대한 궤적을 먼저 계획하고 초기자세에서 계획된 궤적을 따라 매 순간 역기구학을 풀어서 각 관절의 값을 구한다. 여기서 무게 중심의 위치를 구하고, 실제 안정영역에 만족하는지 판별하게 된다.

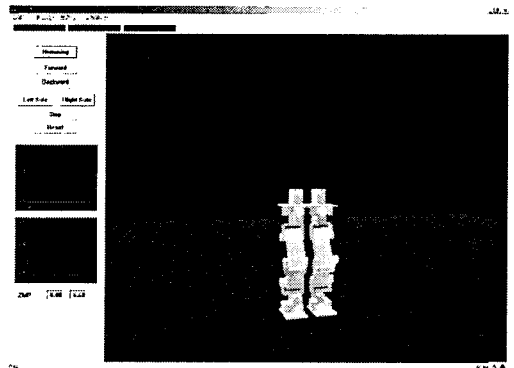


그림 2.4.1 이족 보행 로봇 시뮬레이터

2.4.3 보행 패턴

본 논문에서 실험한 보행의 종류는 직진과 후진, 그리고 좌우 이동에 대해 실험하였다. 각 모션에 대한 정적 보행의 안정도의 판단기준은 로봇의 무게 중심이 지지면 내에 존재하는가에 달려있다. 로봇의 이동시 초기 자세는 한쪽 발을 들기 위해 로봇의 무게 중심을 다른 쪽 발로 이동시키는 모션을 먼저 취하게 된다. 이 때 로봇의 허리 부분의 속도가 발바닥의 지지면의 안정도를 벗어나지 않는 범위에서의 최대 속도를 내어 보행시 보다 빠른 정적 보행을 구현하려고 하였다. 아래 그림은 모의 실험을 통해 직진하는 로봇의 모션과 무게 중심의 이동을 순차적으로 표현하였다.

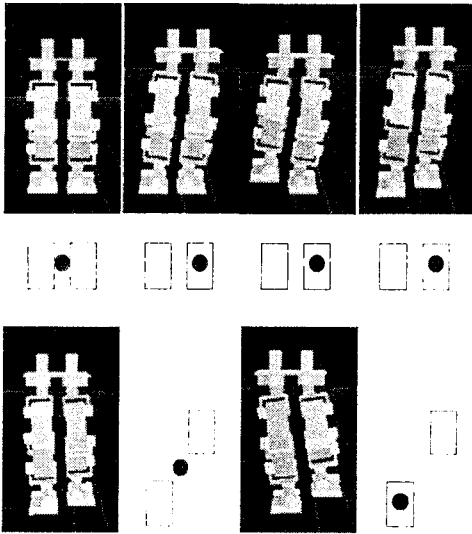


그림 2.4.3 직진 보행시 로봇의 무게 중심의 이동

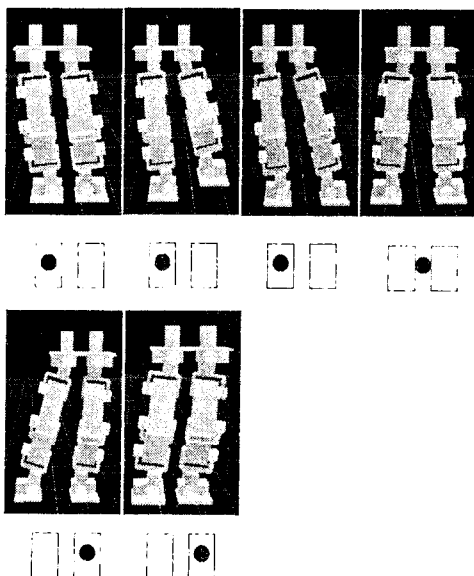


그림 2.4.4 좌우 이동시 로봇의 무게 중심의 이동

2.5 실험 결과

허리와 발목에 대한 무게 중심에 대한 경로의 이동만으로 로봇의 보행에 있어 안정된 자세를 취할 수 있다. 하지만 각각의 모션에 대해 안정화 될 때까지 너무 많은 시간을 소비하여 로봇의 무게 중심이 한쪽 다리로 이동되어 있을 경우 중심을 유지하기 위해 지지하는 다리의 발목 조인트에 과부하가 걸려 몸체에 진동이 발생하는 것을 알 수 있었다. 그림 5는 보폭을 5cm로 직진하는 보행 로봇의 무게 중심의 이동 위치를 나타낸다.

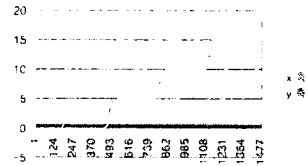


그림 5 직진 보행시 무게 중심의 이동

3. 결 론

이족 보행 로봇의 정적 보행에 있어서 실제 로봇의 무게 중심에 대한 허리와 발목에 대한 궤적의 경로 계획만으로 보행이 가능하다. 그러나 전체적인 움직임이 너무 느리고 하나의 움직임이 완료되기까지 많은 시간이 소비된다. 그 이유는 하나의 모션이 완전히 안정화될 때까지 다음 모션을 취하지 않는 것에 있다. 따라서 로봇의 정적 보행에 있어 각각의 모션에 대해 안정도의 임계값을 정함으로 보다 빠른 보행이 가능 할 것이다.

[참 고 문 헌]

- [1] Qiang Huang, Kazuhito Yokoi, Shuuji Kajita, Kenji Kaneko, Hirohiki Arai, Noriho Koyachi, Kazuo Tanie, "Planning Walking Patterns for a Biped Robot", IEEE Robotics and Automation, Vol 17, NO.3, June 2001.
- [2] Bernard Espiau, Ronan Boulic, "On the Computation and Control of the Mass Center of Articulated Chains", 1998
- [3] Kwang-Jin Choi and Hyeong-Seok Ko, "On-line Motion Retargetting", The Seventh Pacific Conference on Computer Graphics and Applications October 05 - 07, 1999
- [4] John J. Craig, Introduction to Robotics : Mechanics and Control, 1989