

# 기구학을 이용한 이족보행 로봇의 보행패턴

김동원

인하공업전문대학 디지털전자과

## Kinematic Based Walking Pattern of Biped robot

Dong W. Kim

Dept. of Digital Electronics, Inha Technical College

**요약** 본 논문에서는 기구학을 이용한 이족보행 로봇의 보행패턴 생성방법을 살펴본다. 2족 보행로봇이 3차원 공간 상에서 모든 동작 및 보행이 가능하기 위해 필요한 자유도는 각 다리별로 6자유도이다. 따라서 본 논문에서는 로봇의 보행을 위해 간략화된 보행로봇의 구조를 살펴보고 발목의 경로를 설정한 후 기구학을 이용하여 조인트 각도를 파악하여 생성한다. 또한 로봇의 기구 해석을 위해 한쪽 다리의 조인트들에 대해 좌표계를 설정하였다. 조인트 각도를 역기구학을 이용하면 로봇의 보행 패턴을 생성할 수 있다. 최종적으로 발목의 궤적 설정과 이를 통한 보행 패턴 생성 과정을 살펴보기로 한다.

**주제어** : 이족보행 로봇, 보행패턴, 기구학, 3차원 환경, 자유도, 관절좌표계

**Abstract** In this paper, kinematic based walking pattern generation of biped walking robot is reviewed. Biped walking robot should be consisted of 6 Degree of Freedom(DOF) for each leg to walk properly in 3 dimensional circumstance. In this paper, simple structure of biped robot is depicted for walking pattern firstly. After fixing path of ankle of the robot, angle joints are coming from kinematic equations. Coordination of joints of a robot was set for dynamic analysis also. So walking pattern of a robot will be designed using dynamic equations of coordination of joint angles. Finally, setting of ankle of robot and pattern generation are key procedures of the robot walking.

**Key Words** : Biped walking robot, walking pattern, kinematics, 3 dimensional circumstance, degree of freedom(DOF), coordination of joints.

## 1. 서론

2족 보행로봇은 계단이나 문턱과 같이 바퀴형 로봇이 이동하기 어려운 환경에서도 이동이 가능하며 인간과 유사한 보행이 가능하기 때문에 인간 생활 환경에 적용이 용이한 장점이 있다. 1960년대 후반 Vukobratovic이 인간형 2족 보행로봇에 관한 모델링을 처음 제시한 이후[1]

2족 보행로봇에 관한 많은 이론적 혹은 실험적 연구들이 수행되어져 왔다. 1998년에는 일본의 혼다 사에서 인간형 2족 보행로봇 P3가 발표되었으며 이는 산업 및 인간 생활에서의 2족 보행로봇의 활용 가능성을 입증하였다 [2-12]. 이처럼 2족 보행로봇은 엔터테인먼트 로봇, 인력 보조 로봇, 서비스 로봇 등 많은 분야에서 활용 및 연구가 진행되고 있다. 그러나 2족 보행로봇은 높은 자유도와

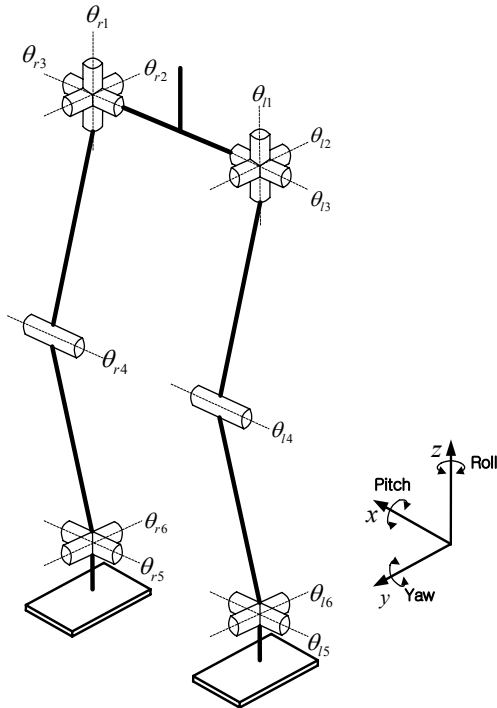
\*교신저자 : 김동원(dwnkim@inhac.ac.kr)

접수일 2018년 10월 13일 수정일 2018년 11월 05일 심사완료일 2018년 11월 10일

직렬형 링크 구조로 인해 안정도를 해석하거나 제어하기가 어려운 특성이 있다. 이러한 2족 보행로봇의 난해한 특성은 안정적인 로봇을 개발하기 위해 해결해야 할 문제점으로 작용한다. 본 논문에서는 일반적인 보행패턴 생성방법으로 기구학을 이용한 방법에 대하여 살펴보기로 한다.

## 2. 로봇의 구조

2족 보행로봇이 3차원 공간상에서 모든 동작 및 보행이 가능하기 위해 필요한 자유도는 각 다리별로 6자유도이다. 그림 1은 일반적인 2족 보행로봇의 하체 구조를 나타내고 있다.



[Fig. 1] Structure of general biped walking robot.

그림 1에서 회전 조인트는 원통형으로 표시했으며 회전축의 방향은 점선으로 나타내었다. 굵은 실선은 링크를 나타낸다. 일반적인 2족 보행로봇은 골반에 3자유도, 무릎에 1자유도, 발목에 2자유도를 갖도록 제작된다. 각 조인트의 회전축은 기구 해석을 쉽게 하기 위해 서로 평행하거나 수직 관계에 있도록 한다. 기준 좌표계의 원점

의 위치나 축의 방향은 제작자가 해석이 편하도록 임의로 정한다.

각 조인트의 각도는 오른발일 경우  $\theta_{r1} \sim \theta_{r6}$ 으로 나타내었으며 왼발일 경우  $\theta_{l1} \sim \theta_{l6}$ 으로 나타내었다. 각도의 번호는 골반에 가까운 쪽으로부터 1씩 증가하며 각 조인트 각도의 역할은 다음과 같다.

- $\theta_{r1}, \theta_{l1}$  : 다리 전체를 뒤풀(roll) 조인트. 제자리 회전이나 곡선을 그리는 보행에 사용되며 직진 보행시 고정되어 있다.
- $\theta_{r2}, \theta_{l2}$  : 로봇의 다리 전체를 좌우로 움직이는 (yaw) 조인트. 직진 보행중에는 로봇의 좌우 무게 중심 이동을 위해 사용된다.
- $\theta_{r3}, \theta_{l3}$  : 로봇의 다리 전체를 앞뒤로 움직이는 (pitch) 조인트.
- $\theta_{r4}, \theta_{l4}$  : 로봇의 무릎 조인트.
- $\theta_{r5}, \theta_{l5}$  : 로봇의 발을 앞뒤로 움직이는 발목의 조인트.
- $\theta_{r6}, \theta_{l6}$  : 로봇의 발을 좌우로 움직이는 발목의 조인트.

## 3. 보행패턴의 생성

로봇의 보행을 구현하기 위해서는 로봇의 동작에 따른 각 조인트의 각도값을 구할 필요가 있다. 각 조인트의 각도값은 6축 매니퓰레이터에서 주로사용하는 기구학(kinematics)을 그대로 사용할 수 있다. 즉 로봇의 발바닥을 끝단으로 놓고 골반의 중심을 기준 좌표의 원점으로 설정한 후 기구학(kinematics)을 이용하여 해석한다.

로봇의 보행 패턴은 보행에 따른 발목의 경로를 설정하고 기구학을 이용해서 이 경로에 따른 각 조인트의 각도를 알아냄으로써 구한다[3-15]. 기구학에서는 로봇의 각 조인트에 좌표계를 설정하고 동차 변환을 이용해 로봇 각 부위의 위치와 방향을 알아낼 수 있다. 동차 변환은 두 좌표계 사이의 회전/이동 관계를 나타내는 변환 행렬을 이용하여 특정 점의 위치를 다른 좌표계로 표현하는 방법이다. 좌표계 A로 표현된 점 P를 좌표계 B를 이용해 나타내기 위해서는 식(1)과 같이 변환 행렬을 이용하여 나타낼 수 있다.

$${}^B P = {}^B A T {}^A P \quad (1)$$

여기서  ${}^A P$ 와  ${}^B P$ 의 위 첨자는  $P$ 를 각각  $A$ 좌표계와  $B$ 좌표계의 단위벡터를 이용해 나타낸  $4 \times 1$  크기의 행렬이며 식(2)와 같이 마지막 행에 1이 추가된 형태이다.

$${}^A P = \begin{bmatrix} p_{x_A} \\ p_{y_A} \\ p_{z_A} \\ 1 \end{bmatrix}, \quad {}^B P = \begin{bmatrix} p_{x_B} \\ p_{y_B} \\ p_{z_B} \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

또한  ${}^B A T$ 는 좌표계  $A$ 에서  $B$ 로의 변환 행렬로서 식(2.3)과 같은  $4 \times 4$  크기의 행렬이다.

$${}^B A T = \begin{bmatrix} {}^B A R & {}^B P_{Aorg} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$= \begin{bmatrix} \hat{X}_A \cdot \hat{X}_B & \hat{Y}_A \cdot \hat{X}_B & \hat{Z}_A \cdot \hat{X}_B & {}^B x_{Aorg} \\ \hat{X}_A \cdot \hat{Y}_B & \hat{Y}_A \cdot \hat{Y}_B & \hat{Z}_A \cdot \hat{Y}_B & {}^B y_{Aorg} \\ \hat{X}_A \cdot \hat{Z}_B & \hat{Y}_A \cdot \hat{Z}_B & \hat{Z}_A \cdot \hat{Z}_B & {}^B z_{Aorg} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

여기서  ${}^B A R$ 은 좌표계  $B$ 에서  $A$ 로의 회전 행렬이며 두 좌표계의 단위벡터간의 내적으로 이루어진다.  ${}^B P_{Aorg}$ 는 좌표계  $B$ 로 나타낸 좌표계  $A$ 의 원점이다.  ${}^B A R$ 와  ${}^B P_{Aorg}$ 는 각각 식(4)와 식(5)로 나타낼 수 있다.

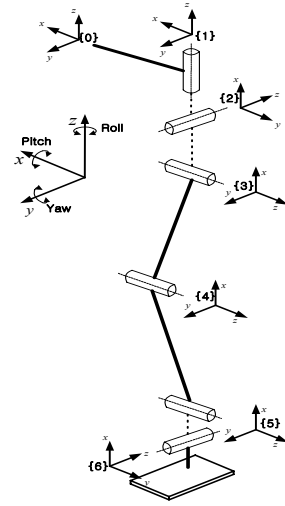
$${}^B A R = \begin{bmatrix} \hat{X}_A \cdot \hat{X}_B & \hat{Y}_A \cdot \hat{X}_B & \hat{Z}_A \cdot \hat{X}_B \\ \hat{X}_A \cdot \hat{Y}_B & \hat{Y}_A \cdot \hat{Y}_B & \hat{Z}_A \cdot \hat{Y}_B \\ \hat{X}_A \cdot \hat{Z}_B & \hat{Y}_A \cdot \hat{Z}_B & \hat{Z}_A \cdot \hat{Z}_B \end{bmatrix} \quad (4)$$

$${}^B P_{Aorg} = \begin{bmatrix} {}^B x_{Aorg} \\ {}^B y_{Aorg} \\ {}^B z_{Aorg} \\ 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

그림 2는 로봇의 기구 해석을 위해 그림 1의 한쪽 다리의 조인트들에 대해 좌표계를 설정한 모습이다. 여기서 굵은 선은 길이가 있는 실제 링크이며 점선은 서로 교

차하는 조인트를 분리하기 위해 나타낸 길이가 없는 가상 링크이다. 각 링크 길이의 단위는 mm이다.

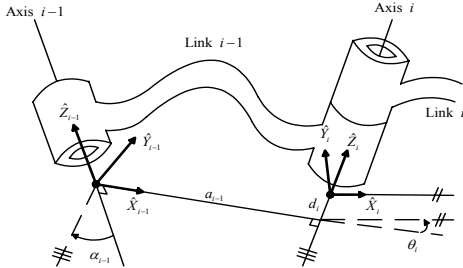
좌표계의 순서는 골반의 중앙을 기준좌표의 원점으로 잡고 발끝으로 갈수록 순서대로 숫자를 증가시키며 번호를 붙였다. 각 좌표계의 번호는  $\{n\}$ 으로 나타내었다. 즉, 0번 좌표계는 골반 중앙을 원점으로 갖는 기준좌표계이며, 1번 좌표계는 골반의 롤(roll)에 해당하는 조인트, 2번 좌표계는 골반의 요우(yaw)에 해당하는 조인트에 지정하였다. 각 좌표계는 조인트의 회전축의 방향을  $z$ 축으로 정하였으며 다음 좌표계의 회전축과의 공통법선을  $x$ 축으로 잡고  $y$ 축은  $z$ 축과  $x$ 축에 의해 정해진다. 각 좌표계는 해석을 편하게 하기 위해서 축이 서로 직교하며 이웃하는 좌표계 사이에 회전 변환을 적게 하여 파라미터가 간단하게 나오도록 하였다. 각 조인트에 좌표계를 설정했을 경우 이웃하는 두 좌표계  $i-1$ 과 좌표계  $i$  사이의 변환 행렬을 구하기 위해서 네 개의 D-H(Denavit-Hartenberg)파라미터를 구한다. D-H파라미터는 다음의 네가지 파라미터로 이루어지며 그림 3에 표시하였다.



[Fig. 2] Coordination of each joint of robot

- $\alpha_{n-1}$  :  $\hat{X}_{i-1}$  방향으로 측정된  $\hat{Z}_{i-1}$ 과  $\hat{Z}_i$ 사이의 각도
- $a_{n-1}$  :  $\hat{X}_{i-1}$  방향으로 측정된  $\hat{Z}_{i-1}$ 과  $\hat{Z}_i$ 사이의 거리
- $d_{i-1}$  :  $\hat{Z}_{i-1}$  방향으로 측정된  $\hat{X}_{i-1}$ 과  $\hat{X}_i$ 사이의 거리

- $\theta_i$  :  $\hat{Z}_{i-1}$  방향으로 측정한  $\hat{X}_{i-1}$ 과  $\hat{X}_i$ 사이의 각도



[Fig. 3] Coordination of each joint of robot and D-H parameters.

이렇게 구해진 D-H파라미터를 식(6)에 대입하여 좌표계 사이의 변환행렬을 구하고 이를 이용해 로봇의 조인트 각도에 따른 각 링크의 위치 및 방향을 구할 수 있다.

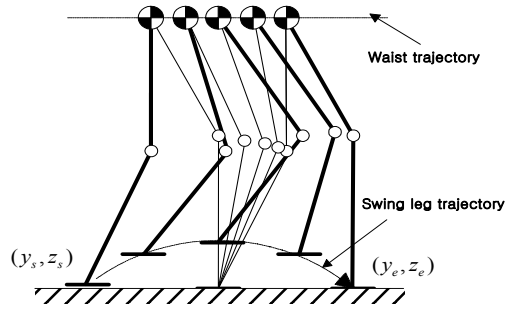
$${}^{i-1}T = \begin{bmatrix} c\theta_i & -s\theta_i & 0 & a_{i-1} \\ s\theta_i c\alpha_{i-1} & c\theta_i c\alpha_{i-1} & -s\alpha_{i-1} & -d_i s\alpha_{i-1} \\ s\theta_i s\alpha_{i-1} & c\theta_i s\alpha_{i-1} & c\alpha_{i-1} & d_i c\alpha_{i-1} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

여기서  ${}^{i-1}T$ 는 좌표계  $i$ 에서  $i-1$ 로의 변환 행렬이며  $\sin$  함수와  $\cos$  함수는 각각  $c$ 와  $s$ 로 줄여서 표기하였다.

역기구학을 이용하면 로봇의 발목의 경로에 따른 조인트의 각도를 구할 수 있다. 역기구학은 크게 분석적인 방법(analytical method)과 수치적인 방법(numerical method)으로 나눌 수 있다. 분석적인 방법은 기구학에 의해 구해진 조인트 각도와 엔드 이펙터(end effector)의 위치/방향 사이의 관계식을 역으로 정리하여 각 조인트의 각도를 시간이나 엔드 이펙터의 좌표에 관한 함수로 나타내어 구하는 방법이다. 수치적인 방법은 하나의 해에 대해서 수렴성을 판단하는 방법으로 해를 구하는 방법이다. 즉 원하는 위치로 엔드 이펙터를 옮기기 위해서는 현재의 조인트 각도를 어떤식으로 변화시켜야 할 것인가를 알아내서 조인트 각도를 찾아내는 방법이다. 본 연구에서 제작된 로봇에 사용된 액추에이터는 RC서보모터로서, 각도를 제어할 수는 있지만 각속도나 각 가속도를 정확하게 제어할 수 없기 때문에 분석적인 방법보다

는 수치적인 방법을 이용하여 해를 구한다.

그림 4는 로봇이 한 발을 내딛는 동안의 양 발의 모양과 상체의 무게중심 및 발목의 경로를 나타낸 그림이다.



[Fig. 4] Trajectory of swing leg and Waist

그림 4와 같이 로봇의 일정 부위가 어떠한 경로를 따라 움직이게 할 것인가를 정한 다음 역기구학을 이용하면 각 관절의 각도를 구할 수 있다. 로봇의 보행을 구현하기 위해서 로봇의 발끝의 경로를 설정하고 이를 일정 시간마다 분해하여 시간에 따른 발목의 이동 경로를 만든다. 시간에 따른 발목의 위치마다 각 조인트의 각도를 역기구학을 이용해 찾아냄으로써 로봇의 보행 패턴을 생성할 수 있다.

$${}^0P_{ee} = {}^0T(\theta_1) {}^1T(\theta_2) {}^2T(\theta_3) {}^3T(\theta_4) {}^4T(\theta_5) {}^5T(\theta_6) {}^6P_{ee} \quad (7)$$

여기서  ${}^0P_{ee}$ 는 기준좌표계(0)로 표현한 발끝의 위치를 나타낸  $4 \times 1$ 크기의 행렬이며,  ${}^6P_{ee}$ 는 6번째 조인트에 지정된 좌표계를 이용해 표현한 발끝의 위치를 나타낸 행렬이다.  ${}^{i-1}T(\theta_i)$ 는 각 좌표계 사이의 변환 행렬이다. 즉  ${}^6P_{ee}$ 는 발목의 모양에 의해 정해지는 일정한 값이며 좌표계 6의 원점과 발바닥까지의 위치를 나타낸다. 즉,  ${}^0P_{ee}$ 는 로봇의 골반의 위치에 대해 발바닥이 어떤 위치에 있는지를 나타낸다. 로봇의 보행 패턴은 시간에 따른  ${}^0P_{ee}$ 의 위치를 정하고 역기구학을 이용해 각 조인트의 각도를 찾음으로써 구할 수 있다.

## 4. 결론

본 논문에서는 이족보행 로봇의 일반적인 보행패턴 생성방법으로 기구학을 이용한 방법에 대하여 살펴보았다. 패턴생성을 위해 간략화된 보행로봇의 구조를 살펴 보았으며 발목의 경로를 설정한 후 기구학을 이용하여 조인트 각도를 파악하여 최종적으로 보행패턴을 생성하였다.

## ACKNOWLEDGMENTS

This research was supported by Basic Science Research Program through the National Research Foundation of Korea (NRF) funded by the Ministry of Education (Grant No. NRF-2017R1D1A1B03031467).

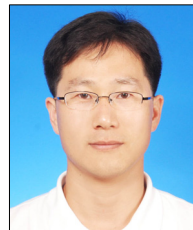
## REFERENCES

- [1] M. Vukobratovic, A. A. Frank, and D. Juricic, "On the Stability of BipedLocomotion" Proc. IEEE Transactions on Biomedical Engineering, Vol.BME-17, No.1, pp.25-36, 1970.
- [2] Hirai, K., et al, "The development of Honda humanoid robot", Proceedings of ICRA 2: pp.1321-1326, 1998.
- [3] John J.Craig, Introduction to Robotics Mechanics and Control, Silma Inc., 1989.
- [4] C.L. Shih, Y.Z. Li, S. Churng, T.T. Lee, and W.A. Cruver, "Trajectory synthesis and physical admissibility for a biped robot during the single support phase," Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation, pp.1646-1652, 1990.
- [5] A. Dasgupta and Y. Nakamura, "Making feasible walking motion of humanoid robots from human motion capture data," Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation, pp.1044-1049, 1999.
- [6] A. Takanish, M. Ishida, Y. Yamazaki, and I. Kato, "The realization of dynamic walking robot WL-10RD," Proc. Int. Conf. Advanced Robotics, pp.459-466, 1985.
- [7] S. Kajita, T. Nagasaki, K. Kaneko, and H. Hirukawa, "ZMP-Based Biped Running Control: The HRP-2LR Humanoid Biped Robot," IEEE Robotics & Automation Magazine, pp.63-72, 2007.
- [8] D. Kim, N.H.Kim, S.J.Seo, and G.T.Park, "FuzzyModeling of Zero Moment Point Trajectory for a Biped Walking Robot," Lect. Notes Artif. Int., Vol.3214, pp.716-722, 2005.

- [9] D. Kim, S.J. Seo, and G.T. Park, "Zero-moment point trajectory modeling of a biped walking robot using an adaptive neuro-fuzzy systems," IEE Proc. Control Theory Appl., Vol.152, pp.411-426, 2005.
- [10] D. Kim, G.T.Park, "Useof Support Vector Machines : Synergism to Intelligent Humanoid Robot Walking Down Slope,"Lect. Notes Comput Sci, Vol.4253, pp.670-676, 2006.
- [11] D. Kim, G.T.Park,Advanced Humanoid Robot Based on the Evolutionary Inductive Self-organizing Network, Humanoid Robots-New Developments, pp.449-466, 2007.
- [12] C. Yin, A. Albers, J. Otnad, P. Haussler, "Stability Maintenance of a Humanoid Robot under Disturbance with Fictitious Zero-Moment Point (FZMP)", IEEE/RJS Intl. Conf. on Intelligent Robots and Systems (IROS), pp.1780-1787, 2005.
- [13] Y. Hasegawa, T. Arakawa, and T. Fukuda, "Trajectory generation for biped locomotion robot," Mechatronics, Vol.10, pp.67-89, 2000.
- [14] M. Vukobratovic and B. Brovac, "Zero-Moment Point-Thirty Five Years of Its Life," Int. J. Humanoid Robotics, Vol.1, pp.157-173, 2004.
- [15] Q. Huang, K. Yokoi, S. Kajita, K. Kaneko, H. Arai, N. Koyachi, and K. Tanie, "Planning Walking Patterns for a Biped Robot," IEEE Trans. Robotics Automation, Vol.17, No.3, pp.280-288, 2001.

김 동 원(Dong Won Kim)

[정회원]



- 2007년 2월 : 고려대학교 전기공학 과 (공학박사)
- 2008년 1월 ~ 2008년 12월 : UC Berkeley(Prof. Zadeh 그룹) EECS Post-Doc.
- 2009년 1월 ~ 2009년 08월 : UC Davis AME Post-Doc.
- 2009년 9월 ~ 현재 : 인하공업전문대학 디지털전자과 교수

<관심분야>

제어시스템, 로봇틱스, 지능연산, 퍼지시스템, 뉴럴네트 워크, 딥러닝 시스템, 휴머노이드 로봇, 지능연산 융합 로봇시스템 등