

## 휴머노이드 로봇의 안정 보행 동작 해석에 관한 연구

### A Study of Stable Walking Analysis for Humanoid Robot

성 유경\*, 공 정 식\*\*, 이 보 회\*\*\*, 김 진 겐\*, 허 욱 렬\*

(Yu kyoung Sung, Jung Shik Kong, Bo-hee Lee, Jin-Geol Kim and Uk-Youl Huh)

\* 인하대학교 전자전기공학부(전화:(032)860-8923, 팩스:(032)863-5822, E-mail : yuky@hotmail.com)

\*\* 인하대학교 자동화공학과(전화:(033)860-8923, 팩스:(032)863-5822, E-mail : tempus@dreamwiz.com)

\*\*\* 세명대학교 전기전자공학부(전화(043)649-1305, 팩스:(043)644-6966, E-mail : bhlee@semyung.ac.kr)

**Abstract :** In this paper, we have designed the humanoid robot's leg parts with 12 D.O.F. This robot uses ankle's joints to confirm stability of walking performance. It is less movable to use ankle's joints than to do upper body's balancing joints like IWR-III, which needs three parts of via points, support leg, swing leg and balancing joints. Instead, the proposed humanoid robot needs support leg and swing leg via points. ZMP(Zero Moment Point) is utilized to guarantee the stability of robot's walking. The humanoid robot uses the ankle's joints to compensate for IWR-III's balancing joints movement. Actually we concern about a motor performance when making a real humanoid robot. So a simulator is employed to know each joint torque of humanoid robot. This simulator needs D-H(Denavit-Hartenberg) parameters, robot's mass property and two parts of via points. The simulation results are robot's walking trajectories and each motor torque. Using the walking trajectories, we can see the robot's walking scene with 3D simulator. Before we develop the humanoid robot, simulation of the humanoid robot's walking performance is very helpful. And the torque data will be used to make humanoid's joint module.

**Keywords :** support leg, swing leg, IWR-III, Zero Moment Point, D-H parameters

#### I. 서론

최근 휴머노이드 로봇의 연구가 활발히 진행되고 있다 [1]. 인간 환경에 로봇이 적응하기 위해서는 바퀴로 이동하는 로봇은 한계를 지닐 수밖에 없으므로 휴머노이드 로봇의 필요성이 증폭되고 있다. 휴머노이드 로봇은 인간과 유사한 구조를 가지고 있기 때문에 인간의 생활공간 내에서 인간 친화적 동작 수행이 용이하고 인간이 수행하기 어려운 일들에 인간을 대신에 안전하게 수행할 수 있다[2]. 이러한 장점에도 불구하고 휴머노이드 로봇은 구조적인 한계로 인하여 안정적 보행을 수행하기가 용이하지 못하다. 이에 보행 안정성에 대한 연구들이 지속적으로 진행되어 오고 있다[3-6]. 기존에 제작된 IWR-III는 다리부가 3개의 피치 관절로만 이루어져 있어 보행 시 안정성을 확보하기 위해 2자유도를 가진 균형관절을 이용하였다. 따라서 IWR-III는 인간의 형상과는 다소 다른 외형을 가지고 있고 보행 시 균형관절의 움직임도 크다. 이에 균형관절의 움직임을 줄이기 위한 많은 연구가 되었다[8]. 하지만 IWR-III는 기구학적 제약으로 인해 인간과 유사한 보행 궤적을 얻을 수 없다.

본 논문에서는 다리부에 12자유도를 가지는 휴머노이드 로봇 모델링 하여 균형관절의 움직임을 발목 관절로 보상하였다. 모델링된 휴머노이드 로봇의 기구학적 특성으로

로봇을 가상적으로 구동했을 때 ZMP와 토크 등의 동역학적 특성을 사용자의 간단한 D-H 성분 입력과 물성치 입력만으로 손쉽게 추출할 수 있는 시뮬레이터를 통해 보행로봇의 보행 시 안정성을 확인하였다. 이를 위해 휴머노이드 로봇의 보행 반경을 정의하고 이를 기초로 궤적 계획을 세워 휴머노이드 로봇을 보행 했을 때 관절의 움직임을 3D 모의 실험기로 확인하였고, 모의 실험기에서 생성된 보행 궤적으로 보행을 수행할 때 입력된 물성치를 근거로 ZMP가 로봇의 지지평면에 있는 것으로 안정보행을 하는지 확인하였다. 그리고 로봇이 안정 보행을 할 때 각 관절에 발생하는 토크를 계산하여 실제 휴머노이드 로봇의 구동부 제작 시 참고 할 수 있는 자료를 얻었다.

#### II. 기구학적 구조

본 논문에서 모델링된 휴머노이드 로봇의 다리부는 지지각(support leg)과 유각(swing leg) 2 부분으로 나누어 해석하였다. Fig. 1은 휴머노이드 로봇의 다리부의 외형이다. 다리부 해석 시 몸체 지지와 추진을 위한 지지각과 다음 보행을 위해 이동하는 유각으로 나누었으며 각각의 보폭과 높이 조절을 위해 6자유도를 가지는 회전 관절로 구성되어 있다. 지지각은 발바닥 부분을 기준 좌표계로 설정하고 유각의 기준 좌표계를 지

지각의 말단 좌표계와 링크시커 기구학적 연쇄가 일어나게 하였다.

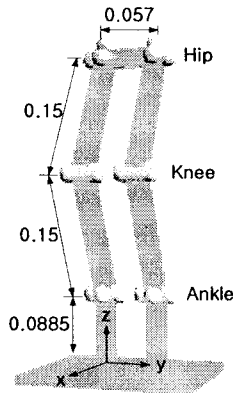


그림 1. 휴머노이드 로봇의 다리부 외형  
Fig. 1. Configuration of humanoid robot's legs

표 1은 모의 실험된 휴머노이드 로봇의 제원을 정리하였다. IWR-III와의 비교 실험을 위해 다리부의 제원을 같게 실험하였다. 상체의 무게는 7번째 링크에 집중되었다고 가정하였다.

표 1 다리부 제원  
Table 1 Specifications of leg module

Legs	6 D.O.F/Leg (Hip:3 Knee:1 Ankle:2)	
	Upper leg length :	150 [mm]
	Lower leg length :	150 [mm]
	Ankle length :	88.5 [mm]
	Length between hip joints : 57 [mm]	
Weight	Legs : 3[kg/leg] × 2[legs] = 6 [kg]	
	Dummy Weights(Body) :	4 [kg]
	Total :	10 [kg]

휴머노이드 로봇의 보행 궤적을 생성하기 위해 지지각과 유각의 경유점(via points) 정보가 요구된다. 로봇의 다리부 관절의 작업 반경을 정의하고 그 반경 내의 보행 궤적을 생성하였다. 표 2는 휴머노이드 로봇의 다리부 관절의 작업 반경을 정의한 것이다.

표 2 로봇의 보행 반경  
Table 2 Walking angle of robot leg

Hip	Yaw	-45 deg. to 45 deg.
	Roll	-135 deg. to -70 deg.
	Pitch	-30 deg. to 120 deg.
Knee	Pitch	0 deg. to -80 deg.
Ankle	Pitch	-45 deg. to 60 deg.
	Roll	-60 deg. to -120 deg.

### III. 동역학 해석

휴머노이드 로봇의 보행 제어를 위한 동특성 해석을 하기 위해 각 링크의 하중은 링크의 무게중심에 집중되어 해석상 12개의 질량모델이고 지지평면은 외력이나 외부 모멘트에 의해 변형되지 않는다. 따라서 지지면은 지면과 항상 평행하다고 가정한다.

각 링크의 움직임은 임의의 점 P를 기준으로 한 질점  $M_i$ 의 운동을 나타내는 D'Alembert의 원리에 의해 식 (1)과 같이 표현된다.

$$\sum_{i=1}^n M_i (\ddot{r}_i - \ddot{P}) \times (\ddot{r}_i + \ddot{C}) + \ddot{M}_T = 0 \quad (1)$$

$M_i$ 는  $i$ 번째 질점,  $\ddot{r}_i$ 는  $i$ 번째 질점의 거리벡터,  $\ddot{P}$ 는 x-y 좌표계에서 점 P까지의 거리벡터,  $\ddot{M}_T$ 는 점 P에 작용하는 반발모멘트의 총합,  $\ddot{C}$ 는 중력가속도를 의미한다.

로봇의 질량은 구동부 관절 무게와 링크 무게의 합이고 링크의 질량 중심은 링크의 중심에 있다고 가정하고 중심좌표 위치를 결정하였다. 표 3은 휴머노이드 로봇의 물성치를 나타낸 것이다.

표 3 휴머노이드 로봇의 다리부 물성치  
Table 3 Mass properties of humanoid robot's legs

Link	Mass(kg)	Centroid		
		x(m)	y(m)	z(m)
1	0.412223	0	0	0.04425
2	0.3	0	0	0
3	0.6597	-0.075	0	0
4	0.6597	-0.075	0	0
5	0.3	0	0	0
6	0.3	0	0	0
7	4.436686	-0.0285	0	0
8	0.0	0	0	0
9	0.0	0	0	0
10	0.3	0	0	0
11	0.3	0	0	0
12	0.6597	0.075	0	0
13	0.6597	0.075	0	0
14	0.3	0	0	0
15	0.3	0	0	0
16	0.412223	0	0	-0.04425

이족 보행로봇은 지면에 고정되어 있지 않아서 보행시 불안정성을 내포하고 있다. 이러한 불안정성을 제거하기 위해 각 링크의 모멘트의 합이 '0'이 되는 ZMP를 식(1)로부터 유도하고 이를 통해 안정성을 판별하였다. 균형점은 식 (2)과 같이 표현된다. 여기서  $M_i$ 는  $i$ 번째 질점의 질량을 나타내고,  $G_x, G_y, G_z$ 는 중력가속도 벡터를 의미하며,  $x_{mp}, y_{mp}$ 는 균형점 좌표를 나타내며,  $\ddot{x}_i, \ddot{y}_i, \ddot{z}_i$ 는 각 질점에서의 선속도 성분을 나타낸다.

$$x_{zmp} = \frac{\sum_{i=0}^{15} (M_i(\ddot{x}_i + G_x)x_i - M_i(\ddot{x}_i + G_x)z_i)}{\sum_{i=0}^{15} M_i(\ddot{x}_i + G_x)} \quad (2)$$

$$y_{zmp} = \frac{\sum_{i=0}^{15} (M_i(\ddot{y}_i + G_y)y_i - M_i(\ddot{y}_i + G_y)z_i)}{\sum_{i=0}^{15} M_i(\ddot{y}_i + G_y)}$$

식(2)의 균형점 좌표가 로봇보행 시 지지평면 안에 있으면 안정성이 확보된다. 모델링된 휴머노이드 로봇은 지지각의 끝단과 유각의 기준좌표계가 일치하기 때문에 지지각의 기준좌표계로부터 유각의 끝단까지 순차적으로 동특성들을 계산할 수 있다. 동역학 해석은 반복적인 수치계산과 빠른 속도의 뉴턴-오일러(Newton-Euler)방정식을 이용하여 자기좌표계에 대한 동특성들을 구하고 이를 다시 지지각 기준좌표계에 대한 각 링크들의 동특성 값들로 표현한다. 뉴턴-오일러 정방향 방정식에서 각 링크의 무게 중심에서의 선가속도를 얻었고 이를 이용하여 휴머노이드 로봇 보행 시 ZMP를 계산할 수 있다. 그리고 뉴턴-오일러 역방향 방정식을 이용하여 각 관절에 발생하는 토크를 얻었다.

#### IV. 보행 알고리즘

IWR-III는 보행을 수행하기 위한 입력 파라미터로는 몸체의 추진 궤적, 유각의 궤적, 그리고 균형점의 궤적이다. 이 값들을 이용하여 균형관절의 움직임을 표현하는 미분방정식을 풀어 보행 중의 균형 관절의 위치를 찾아냈다. 본 논문에서 모델링된 휴머노이드 로봇의 입력 파라미터는 몸체의 추진 궤적, 유각의 궤적이다. IWR-III에서 균형관절의 움직임을 휴머노이드 로봇은 발목의 토크 관절에 의해 보상하였다.

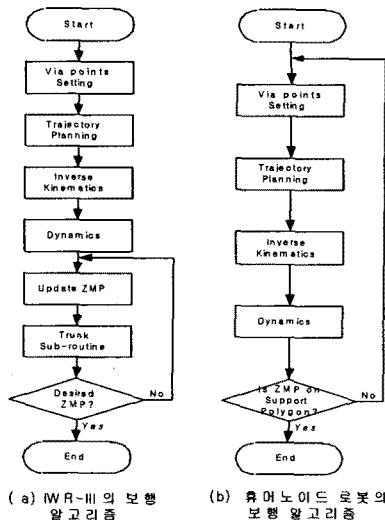


그림 2. 보행 알고리즘의 비교  
Fig 2. Comparison of walking algorithm

주어진 궤적을 보행한 후 ZMP를 확인하고, 지지평면 밖에 ZMP가 놓이면 휴머노이드 로봇의 보행은 불안정하므로 다른 경유점 정보를 입력하여 ZMP가 지지평면 안에 있는 궤적을 생성한다.

#### V. 모의실험

그림 3은 모의 실험기의 주 화면으로 D-H 매개변수, 물성치 그리고 경유점 정보를 입력하여 로봇의 보행 궤적을 생성한다. 그리고 생성된 보행 궤적을 3D 모의 시험기로 확인할 수 있다.

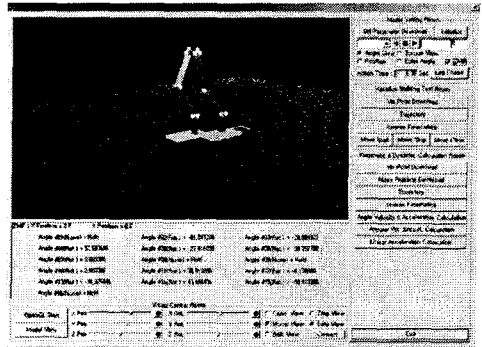


그림 3. 모의 실험기 주 화면  
Fig 3. Main screen of a simulator

그림 4는 12개의 관절 중에서 보행 시 토크가 큰 관절을 나타낸 것이다. 지지각의 발목 관절의 토크가 가장 큰 것을 볼 수 있다.

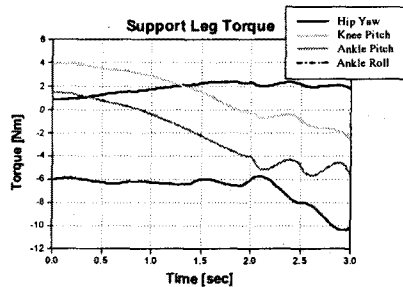


그림 4. 지지각의 토크  
Fig 10. Torque of support leg

그림 5는 모의 실험기에서 얻은 4보 보행 궤적을 보행하는 휴머노이드 로봇의 ZMP를 나타낸 것이다. 붉은 색으로 표시된 부분은 로봇의 발바닥이다. 1, 3보는 오른쪽 다리가 지지각이고 2, 4보는 왼쪽 다리가 지지각이다. 첫 번째 보행에서 ZMP가 발바닥을 벗어 나고 있지만 두 다리 지지상태이므로 보행은 안정한 상태이다.

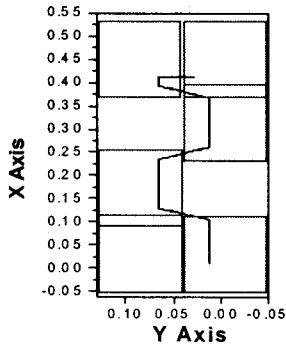


그림 5. 휴머노이드 로봇의 ZMP  
Fig 5. ZMP trajectory of humanoid robot

그림6은 3D 모의 실험기를 통한 휴머노이드 로봇의 보행이다.

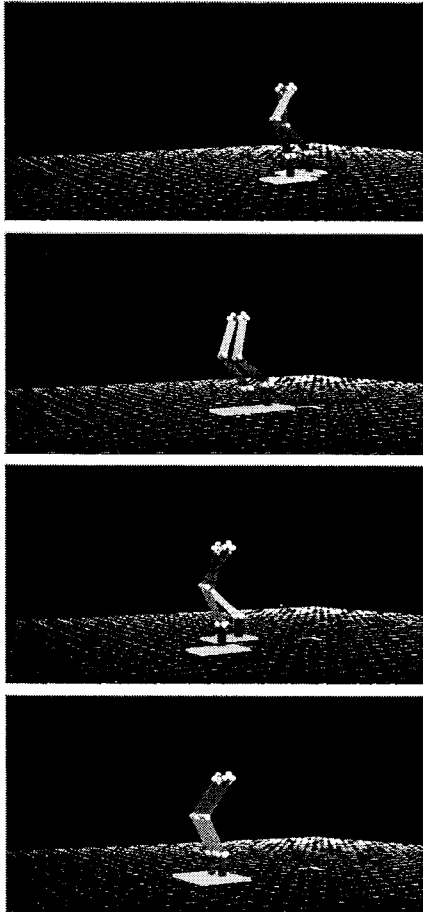


그림6. 휴머노이드 로봇의 보행  
Fig6. Walking performance of humanoid robot

## W. 결론

본 논문은 다리부에 12자유도를 가지는 휴머노이드 형태의 로봇을 제작하기 앞서 모의 실험기에 의해 기본적인 보행 궤적 생성과 보행 궤적 보행 시 각 관절에 발생하는 토크를 얻었다. 제안된 휴머노이드 로봇은 기존의 IWR-III의 균형관절 대신 발목 관절을 이용하여 ZMP를 보상하여 상체부의 균형관절에 의해 ZMP보상이 이루어진 IWR-III보다 유연한 보행을 계획할 수 있다. 제작된 시뮬레이터에서 생성된 보행 궤적은 3D 그래픽 모의 실험기를 이용하여 확인 할 수 있고 각 관절의 토크 데이터를 실제 휴머노이드 관절부의 모터 선정 시 유용한 자료로 사용될 수 있다.

앞으로 모델링된 휴머노이드를 실제 제작하고 발목 관절에 의해 ZMP를 제어할 수 있는 제어 수식을 유도하여 다양한 보행 궤적을 생성할 것이다.

## 후기

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(R01-2003-000-10364-0) 지원으로 수행되었음.

## 참고문헌

- [1] Sakagami, Y., Watanbe, R., Aoyama, C., Matsunga, S., Higaki, N. and Fujimura, K., "The intelligent ASIMO : System Overview and Integration", IEEE/RSJ International Conference, Vol. 3, pp.2478-2483, 2002.
- [2] Nuriyuky, K. "Design and Experiments of Advanced Leg Module for Humanoid Robot Development", IEEE/RSJ International Conference pp.3040-3045, 2002.
- [3] Furusho, et al., "Sensor-Based Control of a Nine-link Biped", Int.J. of Robotics Research, Vol. 9, No.2, pp.83-98, 1990.
- [4] Shih, C.L., et al., "Trajectory Synthesis and Physical Admissibility for a Biped Robot During the Single Support Phase", IEEE Robotics and Automation, pp.1646-1652, 1990.
- [5] Vukobratovic, M. and Stepanenko, "Mathematical Models of General Anthropomorphic Systems", Mathematical Bioscience Vol. 17, pp.191-242, 1973.
- [6] Kenneth J. Waldron, "Realization of Dynamic Biped Waling Stabilized with Trunk Notion Under Known External Force", Advanced Robotics, pp.299-310, 1989.
- [7] Noh Kyung-Gon, Kong Jung-Shik, Kim Jin-Geol and Kim Kisik, "Gait Implementation of a Biped Robot with Smooth Walking Pattern", J. of the KSPE Vol. 19, No.7, pp.43-50, 2002