

보행형 이동 로봇의 동적 걸음 계획

유승환*(전남대학교 기계공학과 대학원), 김정훈(전남대학교 기계공학과 대학원),
김영배(전남대학교 기계공학과)

Dynamic Walking Planning for a Legged Moving Machine

S. H. Yu (Mechanical Eng. Dept. CNU), J. H. Kim (Mechanical Eng. Dept., CNU),
Y. B. Kim (Mechanical Eng. Dept., CNU)

ABSTRACT

In this paper ZMP was considered in order to get a walking stability, so the gait in the stable domain was realized through putting the stability margin in the sole domain of a foot. It is assumed that the robot's legs have 12 joints to operate a open-loop drive and there was no external disturbance under walking phases, additionally, the robot is walking on the flat plane. It was observed that the robot's walking trajectory, locus of COM and ZMP after imposing the motion to each joint. For realizing the simulation considering ZMP and movement of mass center, it was checked if it is stable for the constraint robot model to walk in stability and the feasibility was estimated about its dynamic gait. Eventually it was shown that a constraint gait algorithm is able to realize.

To verify the proper walking process, ZMP(Zero Moment Point) theory is applied and the simulation has been done by ADAMS.

Key Words : Legged Walking Robot (보행형 로봇), Mobility Performance (이동성능), Stability (안정성)

1. 서론

산업 로봇 위주의 로봇 산업에서 최근의 인터넷 기술을 포함한 정보공학기술(IT) 및 생명공학기술(BT)과 접목한 새로운 형태의 로봇들이 속속 등장하고 있다. 산업 로봇의 고정형 로봇으로부터 벗어나 인간 환경 내에서의 다양한 서비스를 목적으로 하는 이동형 로봇의 개발이 되고 있다.¹

이와 같은 필요성에 힘입어 보다 적극적인 인간과의 친밀성 확보와 접근의 용이성을 위해 바퀴형 로봇 보다는 보행형 로봇의 필요는 절실해지고 있다. 인간과 육상 동물의 보행형 이동은 바퀴형 이동보다 훨씬 더 자유롭고 다양한 이동능력을 발휘할 수 있다. 특히 불규칙 노면, 계단, 경사로, 장애물이 있는 환경에서는 더욱 자유롭다. 인간의 서비스를 원활하게 수행하기 위해서는 같은 인간환경 내에서 활동 가능하여야 하고, 운동성능과 더불어 안전성은 필수적인 요소이다.

보행형 로봇의 운동방식은 매우 복잡할 뿐만

아니라, 강한 비선형성의 특성을 가진다. 이를 해결하기 위해 2족 보행 로봇의 제어를 위해 시스템을 간략화 하여 선형화된 모델로 변환하고, 선형제어 이론을 적용하여 구현하고자 하였다.⁴ 그러나 실제로 운동방식을 유도하는데 있어서 지면과의 접촉 반력, 기어의 백래쉬 등은 선형화가 어렵고, 시스템 모델링 과정에서 간략화된 부분이나 시스템 파라미터들의 불확실성으로 인해 제어하는데 많은 제약을 받는다.

최근에는 컴퓨터의 발전에 힘입어 이런 문제점들을 극복하기 위해 많은 비선형 제어 기법들이 연구되고 있다. 이러한 방법 중에는 계산-토크 방법에 기초한 임피던스 제어, 힘/위치 혼합제어기법 등이 있다. 그러나 이 방법들은 시스템의 파라미터들이 모두 규명되어야만 적용이 가능하다.

본 논문에서는 2족 보행 로봇을 모델로 하여 동역학적 시뮬레이션을 통한 보행 로봇의 보행 알고리즘에 대해 연구하였다. 보행의 안정성을 확보하기 위하여 ZMP를 고려하였으며 발바닥 영역내의

안정 여유를 두고서 안정영역내의 보행을 구현하였다. 보행 시뮬레이션은 12 관절로봇을 모델로 구성하였으며 평지 직진보행을 기준으로, 보행시 외란은 없는 것으로 가정하였다. 로봇의 이동은 계산된 알고리즘에 의해 각 관절에 모션을 주고 그 모션에 의해 생성되는 보행궤적을 따라 이동하는 로봇을 관찰하고, 보행시의 지면과 로봇 발바닥과의 반발력을 측정하였다. 그리고 동적인 보행에 ZMP 및 무게중심의 이동을 추종하는 시뮬레이션을 실현함으로써 제안된 로봇 모델의 보행의 안정성 확보 여부를 확인하고 모델의 동적 걸음새에 대한 타당성을 검토하였다.

2. 보행 이론

2족 보행에 있어서 다리의 이동 과정은 크게 3분류로 나누어 질 수 있다. 첫 번째는 두 다리가 땅에 닿아있는 경우인 2족 지지상태(Double support phase)이며, 두 번째는 한쪽 다리만 지지하고 있는 경우인 1족 지지상태(Single support phase), 세 번째는 공간상에 두 다리가 떠 있는 경우로 빠른 속도로 달리는 상태(Running phase)로 분류할 수 있으며, 본 연구에서는 실제보행과 관련된 2족 지지상태와 1족 지지상태에 관해서 논하기로 한다.

2족 보행 로봇의 진행을 위해서는 지지다리와 이동다리의 우선 선택을 하고 난 뒤에 다리 위치가 경유하게 될 궤적을 따라서 보행이 수행 된다. 3차원 공간상에서 보행은 Fig.2 에서와 같이 로봇의 진행방향(longitudinal, x-direction), 지면에 수직인 운동(vertical, z-direction) 과 로봇의 진행방향에 수평운동(horizontal, y-direction)으로 나누어지며, 본 연구에서는 로봇의 진행방향을 포함한 평면에 대한 수직인 면만을 고려하기로 한다.

로봇의 보행은 정적 보행과 동적 보행의 형태로 분류 할 수 있다. 정적 보행은 COG 를 이용하고, 동적 보행은 ZMP 를 확보하여 Fig.3 과 같은 안정 여유(Stability margin)을 크게 하여 안정된 보행을 실현하지만, 동적 보행에 있어서 2족 보행의 중요한 문제점은 앞에서 말한 바와 같이 두 다리의 빠른 속도로의 이동에 따른 안정성의 확보이다. 안정적인 2족 보행을 위해서는 수학적 동역학 모델의 계산과 시뮬레이션의 수행 그리고 시스템의 성능의 분석이 필수적이다.

Fig.1 에 나타난 것처럼 왼발이 지면을 지지한다면 오른발이 궤적에 따라 움직이고 다시 왼발과 오른발의 궤적을 바꾸어서 보행의 과정을 실행하게 된다. 일반적으로 보행의 과정 중 지면과 발의 접촉력과 반발력 등을 고려하여 보행중에 발이 지면에 착지할 때에 발가락 부분이 먼저 닿도록 하거나

발뒤축 부분이 먼저 닿게 하여 그 충격력을 줄이는 경우가 있으나⁶ 본 논문에서는 그런 경우를 배제하고 실제 한 발로 지지한 상태에서 보행시에 생성되는 COG(무게 중심) 및 ZMP를 이용한 안정성 확보에 그 중점을 두고자 한다.

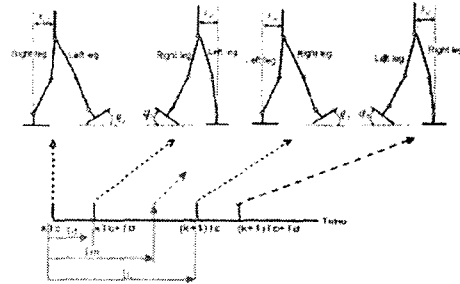


Fig. 1 Walking Cycle & Walking Gait

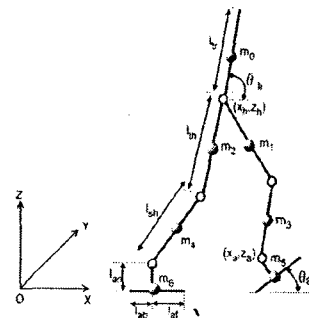


Fig. 2 Coordinate of Biped Robot

3. 보행 패턴 생성

본 연구에서 보행 패턴 생성은 발목의 궤적과 골반의 궤적을 x-z평면상에서 3차 곡선 함수를 이용하여 계산하였다.⁶ Fig.2 와 Fig.3 은 여기에 사용된 보행 로봇의 기구적 구성 변수와 보행 패턴 생성 변수를 나타낸다. 로봇 보행에 있어서는 보행의 형태를 간단히 하기 위하여 다음과 같은 가정을 한다.

- 1)관절의 마찰을 무시한다.
- 2)다리과 지면과의 접촉은 발바닥 면을 기준으로 접촉한다.
- 3)로봇은 보행방향(x 방향)으로 직진보행을 한다.
- 4)이동 다리와 지면의 충돌은 비탄성 충돌로 가정한다. (이동 다리가 지면에 닿은 후 지지 다리는 지면과 계속적으로 접촉한다.)
- 5)몸통은 항상 지면에 수직인 형태를 취한다. (몸통은 롤링이나 피칭이 발생하지 않는다.)
- 6)한 걸음이 정상적으로 끝났을 때 지지다리의 무릎관절은 항상 펴진 상태로 한다.

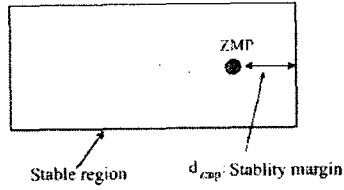


Fig. 3 Stable region & Stability margin

동적 보행의 안정성을 확인하기 위해 X방향과 Y방향의 ZMP 계산과 안정도 평가는 다음 식(3.1)과 (3.2)를 사용하였다.^{2,3,5,6}

$$X_{zmp} = \frac{\sum_{i=0}^n (-m_i x_i (\ddot{z}_i + g) + m_i z_i \ddot{x}_i) + \sum_{i=0}^n M_{ix}}{\sum_{i=0}^n m_i (-\ddot{z}_i - g)} \quad (3.1)$$

$$Y_{zmp} = \frac{\sum_{i=0}^n (-m_i y_i (\ddot{z}_i + g) + m_i z_i \ddot{y}_i) - \sum_{i=0}^n M_{iy}}{\sum_{i=0}^n m_i (-\ddot{z}_i - g)} \quad (3.2)$$

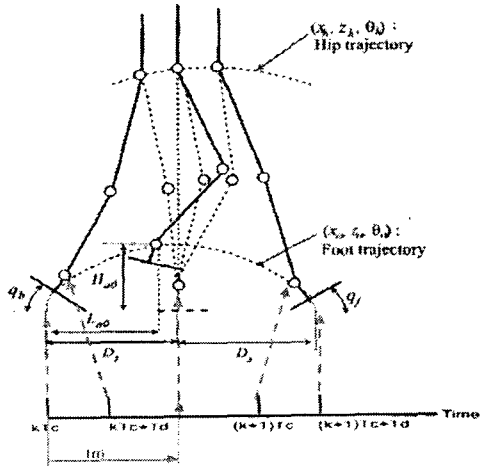


Fig. 4 Trajectory Planning of Hip & Ankle

$$\theta_o(t) = \begin{cases} q_{gs}(k), & t = kT_c \\ q_b, & t = kT_c + T_d \\ -q_f, & t = (k+1)T_c \\ -q_{ge}(k), & t = (k+1)T_c + T_d \end{cases} \quad (3.3)$$

$$x_a(t) = \begin{cases} kD_s, & t = kT_c \\ kD_s + l_{fm} \sin q_b, & t = kT_c + T_d \\ + l_{af}(1 - \cos q_b), & t = kT_c + T_d \\ kD_s + l_{fm}, & t = kT_c + T_m \\ (k+2)D_s - l_{fm} \sin q_f, & t = (k+1)T_c \\ + l_{af}(1 - \cos q_f), & t = (k+1)T_c \\ (k+2)D_s, & t = (k+1)T_c + T_d \end{cases} \quad (3.4)$$

$$z_o(t) = \begin{cases} h_{gs}(k) + l_{fm}, & t = kT_c \\ h_{gs}(k) + l_{af} \sin q_b + l_{fm} \cos q_b, & t = kT_c + T_d \\ H_{ao}, & t = kT_c + T_m \\ h_{ge}(k) + l_{af} \sin q_f + l_{fm} \cos q_f, & t = (k+1)T_c \\ h_{ge}(k) + l_{fm}, & t = (k+1)T_c + T_d \end{cases} \quad (3.5)$$

$$z_h(t) = \begin{cases} H_{h_{min}}, & t = kT_c + 0.5T_d \\ H_{h_{max}}, & t = kT_c + 0.5(T_c - T_d) \\ H_{h_{min}}, & t = (k+1)T_c + 0.5T_d \end{cases} \quad (3.6)$$

$$x_h(t) = \begin{cases} kD_s + x_{sd}, & t = kT_c \\ (k+1)D_s - x_{sd}, & t = kT_c + T_d \\ (k+1)D_s + x_{sd}, & t = (k+1)T_c \end{cases} \quad (3.7)$$

발목의 보행 궤적을 결정하고, 골반의 궤적을 ZMP와 안정여유 그리고 기구학적 구속조건을 고려하여 구한다. Fig.5에 나타난 과정을 통하여 보행에 적합한 보행 패턴을 결정한다.

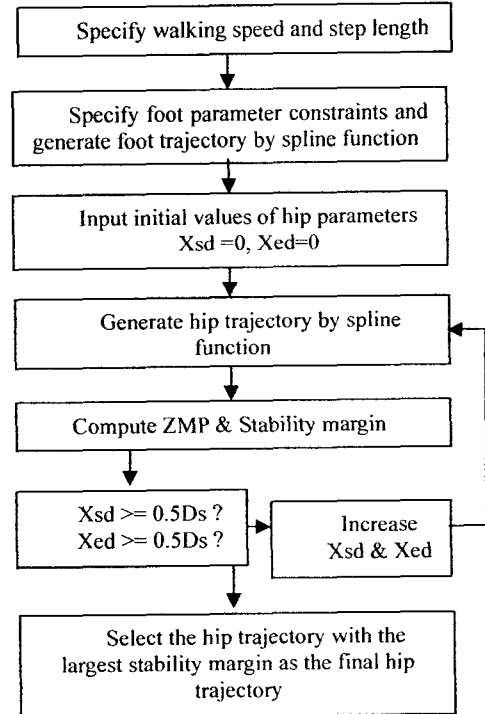


Fig. 5 Algorithm for Dynamic Trajectory Planning

4. 실험 및 토의

각각의 다리에 대하여 골반 3 자유도, 무릎 1 자유도 그리고 발목 2 자유도 로써 총 12 자유도를 갖으며 보행 기구부 만으로 구성이 되는 2족 보행 로봇을 구성하였다. 2족 지지상태에서 1족 지지상태로 되는 1스텝 보행 패턴을 결정하고 각각의 관

걸을 구동하였다.

Fig.6 은 보행시에 로봇 각 요소의 무게 중심과 관절의 이동 위치를 나타내고 있다. R 과 L 은 각각 오른쪽과 왼쪽의 다리를 의미하며 무릎 관절의 아래 부분을 C(Calf)로 윗부분을 T(Thigh)로 나타내었다. 실제적인 ZMP 와 COG 무게중심은 아래 Fig.7 에 나타난 것과 같다. 로봇 보행시에 지지 발 바닥 영역 내에 ZMP 가 존재하면 그 보행은 안정성을 확보한 보행임을 알 수 있다. 실제 보행시 각 요소들의 이동위치를 고려한 무게 중심을 나타내고 있으며 실제 ZMP 는 실제 보행과정 중의 단계에서의 가속도 향을 포함시킨 값이다. 실제 보행시의 COM 과 ZMP 의 값이 거의 유사하게 변화하고 있음을 알 수 있다.

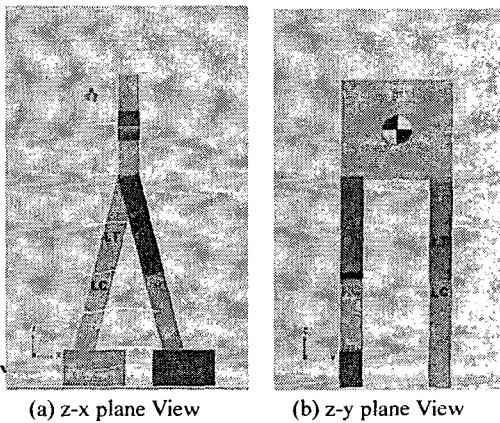


Fig.6 Results of Walking in ADAMS

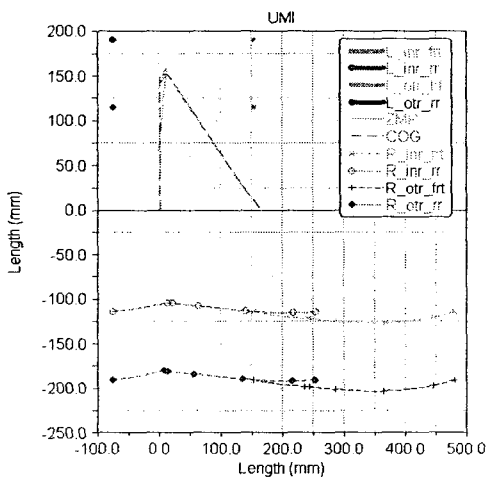


Fig.7 Comparison of Locus on Supporting Area

동역학 시뮬레이션에 있어서 접촉현상을 어떻게 정의하는 가는 중요한 부분이다. 지면과 발바닥

사이에 적용되는 힘은 실제 지면과의 접촉을 할 때에는 수직적인 접촉을 하기 때문에 접촉하는 힘은 보행시의 모든 부하를 받게 된다. 많은 충격량이 발생하지만 보행시 가정에 의해 실제지면과 발바닥 사이에 나타나는 진동 및 충돌량은 무시하였다.

4. 결론

본 연구에서는 ZMP 를 보행의 안정성 확보의 기준으로 삼았으며 동적 걸음새 구현을 위해 ZMP 에 가속도향을 고려하였다. 로봇의 보행을 직진 보행으로 가정하여 시뮬레이션을 수행하였으므로 보폭이 커짐으로 인해서 그 안정성의 확보에는 어려움이 따르게 되고 실제결과상으로도 확인을 할 수 있었다. 가상 모델을 이용하여 시뮬레이션 하였으며, 각 관절에서의 마찰, 기어부에서 발생할 수 있는 백래쉬 문제, 그리고 제어기 구성부에서 일어날 수 있는 문제점 등을 고려하지 않은 상태에서 실제 거동 만을 살펴보고자 시뮬레이션 하였으므로 실제 보행과는 많은 차이가 있을 수 있다. 그러나 동적 보행 실현이라는 주제를 가지고 시뮬레이션을 수행한 결과는 실제 로봇을 제작하여 걸음새 제어 및 실제 보행의 연구를 수행하기에 앞서 문제점의 도출과 그 해결에 도움이 되는 정보를 제공한다.

참고문헌

1. 오상록, 로봇사피엔스: 현실로 다가온 인간과 로봇이 공존하는 사회, 한국정밀공학회 춘계 학술대회 논문집, KSPE 03S072, 2003.
2. Park, In-Gyu and Kim, Jin-Geol, Dynamic Walking Planning and Inverse Dynamic Analysis of Biped Robot, J. of the KSPE, Vol. 17, No. 9, pp. 133-144, 2000.
3. Miyashita F., Matsui T. and Kitano T., PINO, The humanoid that walk, Proc. of The First IEEE-RAS Int. Conf. on Humanoid Robots, MIT, 2000.
4. Kazuo Hiai, Masato Hirose, Yuji Haikawa and Toru Takenaka. The Development of Honda Humanoid Robot, Proceedings of the 1998 IEEE International Conference on Robotics & Automation, 1998.
5. Vukobratovic M. and Juricic D., Contribution to the Synthesis of Biped Gait, IEEE Trans. Bio-Med. Eng., vol. BME-16, no. 1, pp. 1-6, 1969.
6. Hirohiko Arai, Noriho Koyachi and Kazuo Tanie, Planning Walking Patterns for a Biped Robot? IEEE Trans. Robotics and automation, vol. 17, no. 3, JUNE 2001.