

이족보행로봇의 보행을 위한 에너지 최적화

김종태, 최상호, 임선호, 김진걸

인하대학교 자동화공학과(E-mail : g9711273@inhavision.inha.ac.kr)

Energy Optimization for The Walking of Biped Robot

Jong-Tae Kim, Sang-Ho Choi, Sun-Ho Lim, Jin-Geol Kim
Dept. of Industrial Automation Eng. Inha Univ

Abstract - This paper is concerned with an energy optimization for the walking of IWR biped robot. The movement of balancing joints are determined by ZMP(Zero Moment Point) and dynamic properties caused by motion of a swing leg. Therefore, ZMP positions have an important role in walking and guaranteeing the stability of a robot. A genetic algorithm is utilized for solving this problem and finding ZMP with a minimum energy at each sampling time during the walk. In this study, we performed an energy optimization with desired ZMP trajectories and motion of balancing joints.

(3) 지지평면과 지지면 사이의 미끄러짐은 일어나지 않는다. 그러므로 다리의 움직임으로 인한 스핀모멘트 및 이에 따른 몸체의 회전을 고려하지 않는다. [그림1]은 IWR의 질량모델을 나타낸 것으로써, 균형추의 무게인 M_0 를 비롯하여 12개의 질량중심이 설정되어 있다.

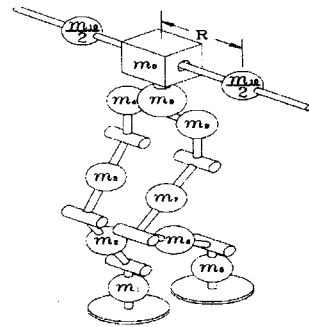


그림1. 이족보행로봇 IWR의 질량모델

1. 서론

로봇 시스템에 있어서 에너지를 최적화하는 것은 매우 중요하며, 장시간 구동을 전제로 생각할 때 결코 간과할 수 없는 문제이다. 특히 보행로봇에 있어서는 에너지 구동원을 시스템에 장착하고 이동이 수행되므로 에너지 소모량을 가능한 최소화해야만이 자율보행에 있어서도 그 성능을 배가시킬 수 있을 것이다.

본 논문에서는 이족보행로봇 IWR을 대상으로 일정 경로를 걸을 때 에너지를 최소화하도록 균형점(ZMP: Zero Moment Point)을 안정영역인 지지다리의 발바닥 지지면 안에서 조절하여 균형추의 움직임을 결정하고 이로부터 균형추의 궤적을 설정하는 데에 목적을 두며, 이를 위해 다변수 비선형 시스템에 적용하기 용이한 유전 알고리즘을 이용하였다. 실제로 균형점을 한점에 고정 시킨채 보행을 수행한 경우와 비교할 때, 균형을 잃지 않는 범위에서 균형관절의 적절한 위치를 선정함으로써 최적의 걸음새를 구현할 수 있다.

2.2 균형점 및 균형관절의 해석

각 링크의 움직임은 임의의 점 P를 기준으로 질점 m_i 의 운동을 나타내는 D'Alembert의 원리를 IWR의 질량계에 대해 적용하면 다음과 같이 정리할 수 있다. [1]

$$\sum_{i=0}^n m_i (\ddot{z}_i + G_z)(x_i - x_{zmp}) - \sum_{i=0}^n m_i (\ddot{x}_i + G_x)z_i = 0$$

$$\sum_{i=0}^n m_i (\ddot{z}_i + G_z)(y_i - y_{zmp}) - \sum_{i=0}^n m_i (\ddot{y}_i + G_y)z_i = 0 \quad (2.1)$$

2. 이족보행로봇 IWR의 시스템 및 해석

2.1 이족보행로봇의 시스템

본 연구대상인 IWR은 기구학적 해석과 각 링크들의 동특성의 해석을 위해 유각, 지지각, 균형관절의 세 부분으로 분리한다. 균형관절은 로봇의 안정 척도인 ZMP를 걸음새와 무관하게 제어할 수 있도록 회전관절과 직진관절인 2자유도로 구성되어 있으며, 균형추를 움직여서 균형점을 제어하는 구조로 이루어졌다. 또한 지지면에 대한 높이 방향 가속도 성분이 없으므로 균형추의 운동방정식을 선형화할 수 있다.

IWR을 모델링하기 위해 다음과 같이 가정한다.

- (1) 각 링크의 하중은 링크의 무게중심에 집중되어 있는 것으로 가정한다. 단, M_{10} 은 관성모멘트를 고려하여 두 개의 질량으로 가정한다.
- (2) 지지평면은 외력이나 외부 모멘트에 의해 변형되지 않는다.

m_i 는 i 번째 링크의 질량, x_i, y_i, z_i 는 지지각 기준좌표계에서의 i 번째 링크의 질량중심에 대한 거리벡터, $\ddot{x}_i, \ddot{y}_i, \ddot{z}_i$ 항들은 기준좌표계에서의 i 번째 질점의 x, y, z 방향 가속도를 의미한다. x_{zmp} 와 y_{zmp} 는 기준좌표계에서의 균형점에 대한 거리벡터를 의미한다. 식(2.1)에서 균형추의 무게인 m_0 를 식에서 분리하고 동역학 해석을 통해 구해질 수 있는 값들을 우변 항으로 넘겨 각각 x_0, y_0 에 대해서 다시 정리하면 다음과 같다.

$$\ddot{x}_0 - \frac{m_0(\ddot{z}_0 + G_z)}{m_0 z_0} x_0 = R_1$$

$$\ddot{y}_0 - \frac{m_0(\ddot{z}_0 + G_z)}{m_0 z_0} y_0 = R_2 \quad (2.2)$$

여기서 R_1, R_2 는 각각 다음과 같이 주어진다.

$$R_1 = \left\{ \begin{array}{l} \sum_{i=1}^n m_i (\ddot{z}_i + G_z)(x_i - x_{zmp}) - \sum_{i=1}^n m_i (\ddot{x}_i + G_x)z_i \\ - m_0 (\ddot{z}_0 + G_z)x_{zmp} - m_0 G_x z_0 \end{array} \right\} / m_0 z_0$$

$$R_2 = \left\{ \begin{array}{l} \sum_{i=1}^n m_i (\ddot{z}_i + G_z)(y_i - y_{zmp}) - \sum_{i=1}^n m_i (\ddot{y}_i + G_y)z_i \\ - m_0 (\ddot{z}_0 + G_z)y_{zmp} - m_0 G_y z_0 \end{array} \right\} / m_0 z_0$$

---(2.3)

이와 같이 균형추의 x방향과 y방향의 운동 제적을 표현하는 전형적인 이차 미분 방정식이 된다.

2.3 에너지 방정식의 유도

식(2.2)는 다음과 같이 일반적인 형태로 표현될 수 있다.

$$\ddot{\beta}(t) + a\beta(t) = b \quad (2.4)$$

이 때 b는 식(2.3)과 같고, a는 다음과 같다.

$$a = - \frac{(\ddot{z}_0 + G_z)}{z_0} \quad (2.5)$$

여기서 전체 기준 좌표계에 대해 β 방향으로의 속도와 가속도는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{\beta} &= \frac{d\beta}{dt} = v \\ \ddot{\beta} &= \dot{v} = \frac{dv}{d\beta} \cdot \frac{d\beta}{dt} = \frac{dv}{d\beta} v \end{aligned} \quad (2.6)$$

이상으로부터 식 (2.4)를 다음 식으로 변형할 수 있다.

$$\beta^2 - 2 \frac{b}{a} \beta + \frac{1}{a} v^2 = C \quad (2.7)$$

식 (2.7)은 에너지에 비례하는 방정식으로서 질량 m을 곱해 정리하면 이를 쉽게 알 수 있다.

$$\frac{1}{2} m v^2 - m b \beta + \frac{1}{2} a m \beta^2 = m c \quad (2.8)$$

식(2.8)에 a,b의 값을 대입하면 첫 번째 항은 균형추의 속도에 의한 운동 에너지이며, 두 번째 항은 링크의 회전모멘트에 의한 에너지를 포함하고 있으며, 세 번째 항은 균형추에 의한 위치에너지임을 알 수 있다. 이로부터 에너지 방정식이 ZMP는 물론이고 $\beta, \Delta\beta$ 에 큰 영향을 받고 있음을 알 수 있다. 즉 균형추의 위치와 속도에 민감하다. 또한, β 자체도 ZMP의 영향을 크게 받는데 이는 다음의 해석적인 방법으로 β 의 해를 구하는 데서 명확히 알 수 있다.

2.4 균형관절 운동의 해석적 풀이

식(2.4)로부터 $\beta(0) = k, \dot{\beta}(0) = l$ 로 하여 그 해를 구하면 다음과 같다.

$$\beta(t) = \frac{b}{a} + (k - \frac{b}{a}) \cos \sqrt{a}t + \frac{l}{\sqrt{a}} \sin \sqrt{a}t \quad (2.9)$$

만일 $\beta(0) = l = 0$ 이라면, 방정식의 해는 다음과 같다.

$$\beta(t) = \frac{b}{a} + (k - \frac{b}{a}) \cos \sqrt{a}t \quad (2.10)$$

이러한 사실로부터 β 와 ZMP 사이의 관계를 구해낼 수 있다. 초기속도를 0으로 가정할 때 식(2.10)으로부터 다음을 알 수 있다.

$$\beta = \frac{b}{a} (1 - \cos \sqrt{a}t) + k \cos \sqrt{a}t \quad (2.11)$$

여기서, $1 - \cos \sqrt{a}t$ 는 항상 음이 아닌 값을 가지므로 b/a 의 부호에는 영향을 미치지 않는다. 이 때, β 는 a와 b에 의해 영향을 받으며, 특히 b에는 ZMP 항이 포함되어 있으므로 ZMP의 위치설정이 β 값에 큰 영향을 주게 됨을 알 수 있다.

3. 모의실험 및 결과

일정 경유점을 지나는 유각의 궤적에 대해서 역기구학을 수행하여 지지각과 유각의 각 관절 값들을 구한다. 그리고 뉴턴-오일러 방정식을 이용하여 각 링크의 운동을 알 수 있다. 이 후 미분방정식의 풀이에 의해 매 순간의 균형추의 위치를 구하게 된다. 이 값이 실제 균형점 안정영역을 만족하면 되는 것이다. [2], [3] 본 실험에서는 유각의 추진에 대해 균형점에 따라 균형추의 위치가 결정된다는 사실에 입각하여 균형점의 위치를 안정 영역 즉, 지면과의 접촉 발바닥 면 안에서 조절하여 에너지를 최소화하는 위치로 결정한다. 이는 기존에 균형점의 궤적을 임의로 생성하는 것보다 에너지 값을 최소화한다. 최적의 균형점을 설정하기 위해서 유전알고리즘 [4], [5]을 사용하였으며 전체 흐름도는 다음과 같다.

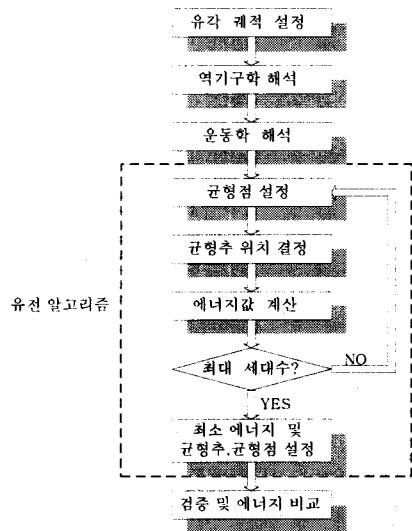


그림2. 에너지 최적화 흐름도

유전알고리즘에서는 적합도 함수로써 각 링크의 에너지의 합을 사용하였으며, 유전자로는 균형점의 X,Y방향 위치를 사용하였고, 이때 구속조건으로 균형점이 지지각의 발바닥 영역 안에 존재하도록 하였다. 이로서 매 순

간 전체 에너지를 최소화시키는 균형점의 최적 위치 값을 구할 수 있다. 사용된 유전알고리즘의 각 설정치는 다음과 같다.

[표1] 유전알고리즘의 설정치

항목	설정치
개체수	50
세대수	50
유전자수	2
교배율	0.8
돌연변이율	0.15

0초부터 3초까지 0.025초 간격으로 매순간 유전 알고리즘을 수행하여 에너지를 최적화시키는 균형점과 균형추 두가지의 궤적들을 찾아낼 수 있었다. 그러나 이 데이터들이 매우 거칠기 때문에 바로 사용할 수는 없고 이를 곡선맞추기(curve fitting)를 통하여 시스템에 무리를 가지지 않는 부드러운 곡선으로 만들 수 있다. 균형추의 X,Y궤적을 각각 곡선맞추기를 행한 후 이를 X-Y 평면에서 표현하여 비교하면 [그림3],[그림4]와 같다.

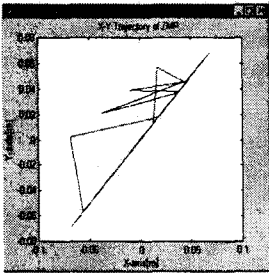


그림3. 곡선맞추기 전 ZMP궤적

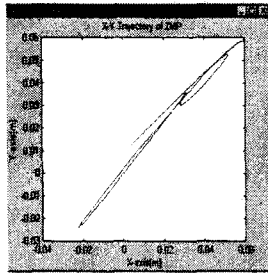


그림4. 곡선맞추기 후 ZMP궤적

이로부터 균형추의 움직임을 구해보면 X축,Y축에 대해 각각 [그림5],[그림6]과 같이 표현되어 진다.

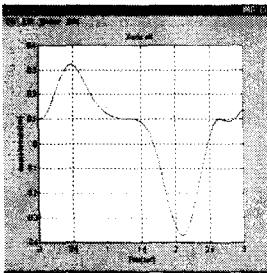


그림5. 균형추의 X축 움직임

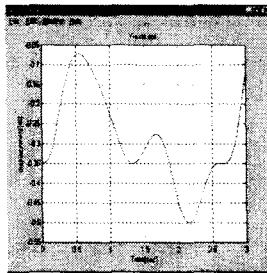


그림6. 균형추의 Y축 움직임

이상으로부터 보행시 에너지를 최소화하는 균형점과 균형추의 움직임을 구하였으며, 이러한 입력 궤적들에 대해 실제 균형점(actual ZMP)이 지지각의 발바닥 영역 내에 존재하는지의 여부를 확인하여 모두 만족함을 알 수 있었다. [그림7]은 보행중의 실제 균형점을 표현하였다.

이러한 결과로부터 균형점의 최적궤적을 사용하여 보행했을 때, 에너지 최소화는 물론 안정도 확보에도 문제가 없음을 알 수 있었다. [그림8]은 이러한 최적 보행시의 에너지를 나타내며, 이 때의 에너지 감소량을 비교하기 위해 종전의 균형점 위치를 지지각 발바닥 중심으로 고정했을 때와 최적화된 궤적 추종 이후의 에너지 변화 그래프를 함께 표현하였다.

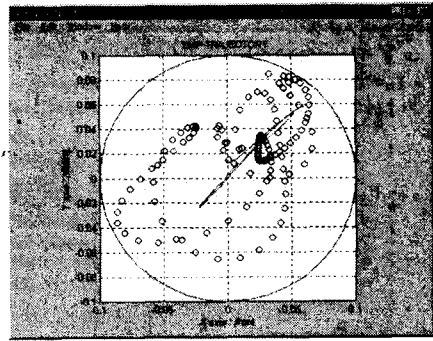


그림7. 실제 균형점(actual ZMP)

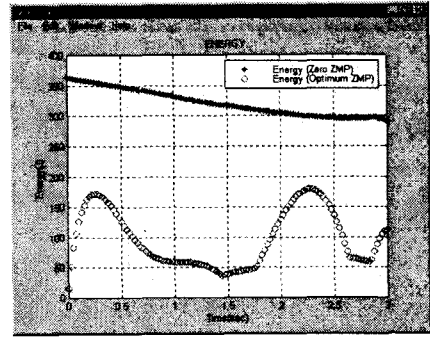


그림8. 균형점에 따른 에너지 변화

4. 결 론

보행로봇에 있어서 에너지를 최적화하기 위한 연구는 다른 시스템보다 더 많이 요구되어지는 사항이다. 본 논문에서는 이족보행로봇 IWR을 대상으로 보행시 에너지를 최적화시키도록 균형점을 선정하였고 이를 통해 균형추의 움직임을 구현하였다. 이 과정에서 유전알고리즘을 사용하였으며, 이는 균형점을 한점에 고정했을 경우보다 균형관절의 움직임 구현 가능 영역이 보다 확대되어 에너지를 최소화할 수 있는 하나의 방법으로 제시될 수 있었다. 향후, 보다 다양한 걸음새에 대해서 균형추의 움직임을 최적화해야 할 것이며, 에너지를 최적화하기 위한 보행시 몸체 추진 속도 등에 대한 연구가 진행되어야 할 것이다.

[참 고 문 헌]

- [1]Sun-Ho Lim, Jin-Geol Kim, "Adaptive Gait Algorithm for IWR Biped Robot", IEEE, PP438-443, 1995.
- [2] 이보희, "이족보행로봇 IWR의 걸음새 구현", 박사학위논문, 인하대학교, 1996
- [3] 최상호, "이족보행로봇 IWR의 동적 안정도를 위한 균형점 해석에 관한 연구", 석사학위논문, 인하대학교, 1998
- [4] David E.Goldberg, Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning, Addison-Wesley Publishing Company, Inc. 1989
- [5] Zbigniew Michalewicz, Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs, Springer-Verlag, Third Edition, 1995