

이족보행로봇의 충돌효과 해석과 이를 고려한 효율적인 걸음걸이의 생성

김홍렬, 김동준*, 김대원**, 김갑일**

*영지대학교 전기공학과, **영지대학교 전기전자공학부

The Analysis of Impact Effect and Efficient Gait Generation Considering the Impact Effect for a Biped Robot

Hong Ryeol Kim*, Dong Jun Kim*, Dae Won Kim**, Kab Il Kim**

*Electrical Eng. Dep., Myong Ji Univ.

**Division of Electrical and Electronics Eng., Myong Ji Univ.

(dwkim@myongji.ac.kr, museros@hotmail.com)

Abstract - This paper proposes a mathematical model of impact force generated by collision between landing foot and ground, by which a dynamic analysis and a supplementation of existing stability criteria are made. By using the proposed dynamic analysis, an energy-optimized gaital algorithm is proposed. To prove the effectiveness of the algorithm, simulation results are shown compared to the result of previous gaital algorithm.

1. 서 론

이족보행로봇의 걸음걸이 구현에 관한 연구는 이족보행이라는 가장 기본적인 기능의 실현을 위한 연구로서, 로봇의 구조에 따라 다양한 형태의 걸음걸이를 구현할 수 있다. 실제로 지금까지 수행된 이족보행에 관한 연구 대부분은 이 걸음걸이 구현에 관한 연구를 중심으로 이루어져 왔다[1][2]. 그러나 지금까지의 걸음걸이 구현에 관한 연구는 기존의 매니플레이터와 이족보행로봇 사이에 존재하는 근본적인 차이를 무시함으로써 실제 구현시에 문제가 되고, 이족보행로봇이 갖는 근본적인 불안정성의 극복에만 치우친 나머지 효율성이라는 측면을 간과한 경향이 있다.

이런 문제점들을 극복하기 위해 일반 매니플레이터와 이족보행로봇 사이에 존재하는 근본적인 차이점을 해석, 적용하고자 수행된 연구[4]는 연산량의 과다와 해석상의 오차 발생 가능성으로 인한 문제가 있다. 효율성의 증대를 위한 연구[3]도 로봇의 보폭이 임의로 변할 수 있다는 점과 유전자 이론과 진화 전략이라는 두개 계층의 걸음걸이 발생기에서 비롯되는 연산량의 과다, 그리고 안정도 판별상의 문제점으로 인해 그 실용성에 문제가 있다.

따라서, 본 논문에서는 일반 매니플레이터와 이족보행로봇의 근본적인 차이의 극복을 위해 지지하는 다리를 기준계로하고 주기적인 착지 시 발생하는 반발력을 수학적으로 해석하여 이를 고려한 경우의 동역학식을 제안한다. 이 동역학식은 연산량

의 감소를 위해 역전자 모델을 이용하여 해석된다. 그리고 충돌 효과에 의해 개선된 형태의 동적 안정도 해석법을 제안한다. 효과적인 걸음걸이의 생성을 위해서는 개선된 동역학식을 이용해 윈도우 탐색법과 유전자 이론을 결합한 형태의 최소 에너지 소비 걸음걸이 생성방식을 제안한다.

2. 착지 순간 반발력의 해석과 응용

이족보행로봇과 일반 매니플레이터의 차이점으로는 이족보행로봇에는 고정된 기준계가 존재하지 않는다는 것과, 착지 순간의 지면과의 주기적인 충돌로 인한 반발력이 발생한다는 것이다. 그러나 정적 보행[1][2]을 하게 되면 그 특성상 지지하는 다리는 항상 고정되어 있으므로, 지지하는 다리와 지면과 만나는 점을 기준계로 설정해 줄 수 있다. 이족보행로봇의 기본 모델은 SD-2 타입 로봇으로서 8개의 관절과 9개의 링크로 구성되어 있으며 X축과 Y축의 동적 안정도 보상을 위한 트렁크가 설치되어 있다[2].

2.1 반발력의 해석

반발력의 해석을 위해 채용할 수 있는 방법 중의 하나가 자유낙하 매니플레이터 해석법이다. 이족보행로봇이 한 발로 지지하는 경우에는, 공중에 있는 발 끝을 엔드이펙터(end effector)라고 했을 때 엔드이펙터에 접촉면이 없으므로 힘의 제한이 존재하게 된다. 따라서 착지 후 엔드이펙터에 가해지는 힘의 변화는 완전한 반발력이 된다. 반발력은 다음 식(1)과 같이 쉽게 구할 수 있다.

$$F_e = (J(q) D^{-1}(q) J^T(q))^{-1} \Delta a_f \quad (1)$$

$$F_e = [F_{ex}, F_{ey}, F_{ez}]^T$$

$$\Delta a_f = a_f(0+) - a_f(0-)$$

여기서 F_e 는 반발력이고 Δa_f 는 착지 전, 후의 발끝에서의 가속도 변화이며 $J(q)$ 는 로봇의 자코비안 행렬, $D(q)$ 는 관성 행렬이다.

2.2 반발력을 고려한 동적 안정도 판별법의 개선

기존에 제안된 바 있는 동적 안정도 판별법인 ZMP는 착지 순간에 발생하는 모멘트와 반발력에 의한 모멘트를 0이라고 가정한 판별 방식이다. 따라서 위에서 구한 반발력의 수학적 모델을 사용하여 이 동적 안정도 판별법을 개선할 수 있다. 본 논문에서는 반발력에 의한 모멘트 외에 로봇의 착지 순간 정적인 상태의 유지를 위한 정력(statics) 보상 토크에 의한 모멘트도 고려하여 정확도를 향상시킨다. 일반적으로 반발력 F_e 가 발생할 때의 정력 보상 토크는 식 (2)와 같다.

$$\tau = J^T(q) F_e \quad (2)$$

착지 순간에 로봇의 정력을 보상해주는 것은 착지 전의 위치 값이 착지 후의 반발력에 영향을 받지 않도록 하기 위한 것이다. 위의 반발력과 정력 보상 토크를 고려한 ZMP 관계식이 식 (3), (4)와 같다. 이 식은 정적 보행의 특성상 착지 순간에 미끄럼이 발생하지 않는다는 타당한 가정 아래 이루어진 식이며, 여기서 α 는 착지 순간에 0에서 1로 변화하는 모드(mode) 값이다.

$$X = \frac{\sum_{i=0}^n (m_i x_i (\dot{z}_i + g) - m_i z_i \ddot{x}_i)}{\sum_{i=0}^n m_i (\dot{z}_i + g)} - \frac{\alpha \sum_{i=0}^n (x_i F_{ex} + z_i F_{ax}) + \alpha J^T(q) F_{ex}}{\sum_{i=0}^n m_i (\dot{z}_i + g)} \quad (3)$$

$$Y = \frac{\sum_{i=0}^n (m_i y_i (\dot{z}_i + g) - m_i z_i \ddot{y}_i)}{\sum_{i=0}^n m_i (\dot{z}_i + g)} - \frac{\alpha \sum_{i=0}^n (y_i F_{ex} + z_i F_{ey}) + \alpha J^T(q) F_{ey}}{\sum_{i=0}^n m_i (\dot{z}_i + g)} \quad (4)$$

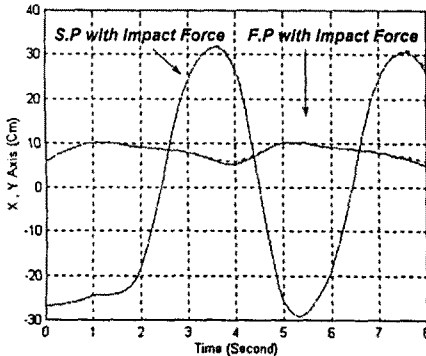


그림 1. 반발력을 고려한 ZMP 궤적

위의 개선된 식 (3), (4)를 이용한 경우의 ZMP 궤적이 그림 1과 같다. 그림에서 S.P는 측면도를 나타내며, F.P는 정면도를 나타낸다.

2.3 반발력을 고려한 동역학 해석

동역학적 해석은 연산량의 단축을 위해 역진자 모델을 이용한다. 일반적으로 이족보행 시 가장 큰 토크를 소비하는 부분은 발목관절에 해당하는 부분이므로 발목 관절의 동역학을 구한다. 반발력을 고려한 동역학 방정식을 위해 위 식 (1)과 (2)를 포함시킨 역진자 모델의 동역학 방정식은 식 (5)와 같다.

$$\tau = I(q) \ddot{\theta} + (F_{ax, ay} + m\ddot{x})L(q)\sin\theta + (-F_{ax} + mg + m\ddot{y})L(q)\cos\theta + \alpha J^T(q) F_e \quad (5)$$

여기서 $L(q)$ 는 가상 역진자 링크의 길이이며, θ 는 지면과 역진자 링크가 이루는 각도이다.

3. 효율적인 걸음걸이의 생성

위의 향상된 성능의 동역학 방정식을 이용해 최소 에너지 소비로써 걸음걸이의 효율성을 증대시키는 방법을 제안한다. 최소 에너지 소비가 가능하게 되면 실용성의 증대는 물론이고 알고리즘적인 측면에서도 그렇지 않은 경우에 비해 훨씬 자연스러운 걸음걸이가 생성됨이 입증된 바 있다[3].

이미 진화전략과 유전자 이론의 두 개 계층을 갖는 걸음걸이 학습 방식이 제안된 바 있으나[3], 이 방식은 다음과 같은 문제점을 갖는다. 첫째, 경로 생성에서 중요한 요소인 보폭을 로봇이 임의로 결정할 수 있기 때문에 균일한 보폭이 필요한 경우에 적용할 수 없게된다. 따라서 본 논문에서는 시작과 마지막 상태 셋포인트(set point)는 고정된 상태에서 나머지 상태의 셋포인트 값을 결정하여 일정한 보폭을 유지시키는 방식을 사용한다. 둘째, 과도한 연산량이 필요하다는 문제점이 있다. 이의 극복을 위해 본 논문에서는 상태 생성 순서를 원도우 탐색 방법으로 찾아나가면서 지역 탐색법인 유전자 이론을 이용하여 최적화하는 방식을 제안한다. 기존의 2계층 방식과 새로 제안된 방식의 연산량은 각각 식 (6), (7)과 같다. 아래 식에서 n 은 링크의 개수, i 은 탐색 횟수, $state$ 는 셋포인트의 상태수를 나타낸다.

$$N_{EP+GA} = n \times i' \quad (6)$$

$$N_{WS+GA} = state \times n \times i \quad (7)$$

일반적인 경우, 식 (7)은 식 (6)에 비해 아주 작은 값을 갖는다. 마지막으로 기존의 단순화된 안정도 판별 방식을 보강하기 위해 정적, 동적 안정도 판별법을 사용한다.

유전자 이론의 적합도 함수를 이루는 항 중에서 에너지는 다음 식 (8)과 같이 표현된다.

$$E = \int_0^T \tau^T \theta dt \quad (8)$$

식 (8)과 기존의 정적 동적 안정도 판별법, 그리고 움직이는 발끝의 위치를 기구학적인 해석을 통해 수식화하여 지면과의 충돌을 방지하는 오차 항을 추가, 식 (9)의 형태인 적합도 함수를 정의 한다.

$$G = \frac{1}{W_1 E_{stability} + W_2 E_{energy} + W_3 E_{swing}} \quad (9)$$

위 식에서 W_1, W_2, W_3 는 각 오차 항의 가중치를 나타낸다. 이 가중치 들은 각 관절 별로 변화하게 된다. 본 논문에서 임의로 사용한 가중치는 표 1과 같다. 표 1에서 엉덩이 관절은 안정도의 보상 역할, 발목 관절은 걸음걸이 형성 역할을 하도록 설정 되었다.

표 1. 각 관절의 가중치

		W1	W2	W3
Supporting Leg	Hip	10	10	1
	Ankle	1	10	10
Swinging Leg	Hip	10	10	1
	Ankle	1	10	10

전체적인 걸음걸이 알고리즘은 그림 2와 같으며, 그림2의 알고리즘을 이용하여 생성된 각 상태의 셋포인트 값들은 표 2와 같다. 그림3의 토크 결과에서 기존의 셋포인트를 데이터베이스화한 방식[2]에 비해 효율이 향상됨을 알 수 있다.

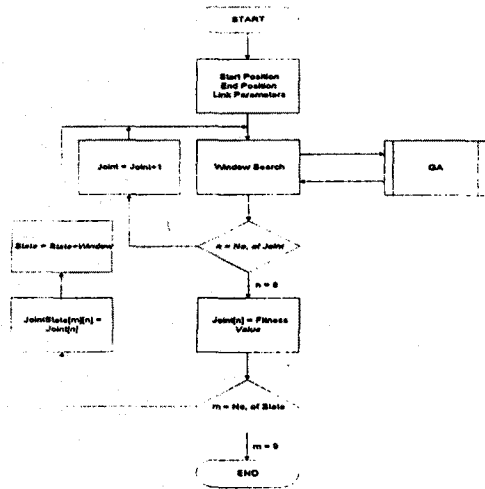


그림 2. 걸음걸이 생성 알고리즘

표 2. 걸음걸이 생성을 통한 셋포인트

	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9
F1	-45	-7	8	39	45	-7	8	39	45
F2	45	23	14	-30	-45	23	14	-30	-45
B1	-135	-148	-156	-169	-225	-148	-156	-169	-225
B2	-45	-38	31	33	45	-38	31	33	45

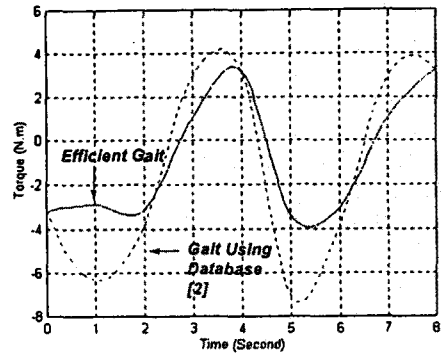


그림 3. 최적화된 걸음걸이의 토크

4. 결 론

지금까지 본 논문에서는 이족보행로봇만의 고유 특성인 착지 순간의 반발력을 수학적으로 해석하여 이를 동적인 안정도 판별법에 적용, 기존의 안정도 판별법의 정확도를 향상시켰다. 그리고 반발력을 고려한 동역학적 해석을 제안하고 이를 이용한 걸음걸이 생성 방식을 제안하였다. 이 걸음걸이 생성 방식은 기존의 방식에 비해 연산량이 많이 감소될 뿐만 아니라 에너지 효율적인 측면에서도 만족스런 결과가 나옴을 확인하였다.

[참 고 문 헌]

- [1] Y. F. Zheng and F. R. Sias Jr., "Design and motion control of practical biped robots," Int. J. on R & A, Vol. 3, No. 2, pp. 70-77, 1988.
- [2] 김홍렬, 김동준, 김대원, 김갑일, "이족보행로봇의 걸음걸이 안정도 판별 및 걸음걸이 학습 알고리즘 구현," 97 전기학회학술대회논문집, pp. 2401-2405, 1997
- [3] Takemasa Arakawa and Toshio Fukuda, "Natural motion generation of biped locomotion robot using hierarchical trajectory generation method consisting of GA, EP Layers," Proc. of IEEE Int. Conf. on R & A pp. 211-216, 1997.
- [4] B. Perrin, C. Chevallerreau, C. Verdier "Calculation of the direct dynamic model of walking robots: comparison between two method," Proc. of IEEE Int. Conf. on R & A pp. 1088-1093, 1997.