

이족보행로봇의 걸음새 변화에 관한 최적화 연구

노경곤*, 김진걸**

*인하대학교 자동화공학과, **인하대학교 전자전기공과부(Tel:032-860-7384)

A Study on the Gait Optimization of a Biped Robot

Kyung-Kon Noh*, Jin-Geol Kim**

*Dept. of Industrial Automation Eng. Inha University, **School of Electrical Eng. Inha University

Abstract - This study deals with the gait optimization of via points on biped robot. ZMP(Zero Moment Point) is most important index in a biped robot's dynamic walking stability. To stable walking of a biped robot, legs's trajectory and a desired ZMP trajectory is required, balancing weight's movement is solved by FDM(Finite Difference Method). In this study, optimal index is defined to dynamically stable walking of a biped robot, and optimization of via points is applied by GA(Genetic Algorithm).

또한 식 (1)을 이용하여 균형추 m_0 의 x방향, y방향 움직임을 식 (2)와 같이 유도한다.

$$\begin{aligned} \ddot{x}_0(t) - Cx_0(t) &= \alpha(t) \\ \ddot{y}_0(t) - Cy_0(t) &= \beta(t) \end{aligned} \quad (2)$$

여기서 $\alpha(t)$ 와 $\beta(t)$ 는 식 (3)과 같이 균형관절의 시간에 따른 X축 방향과 Y축 방향의 운동 궤적을 표현하는 이차 상미분 방정식의 형태로 주어지며, 균형추의 Z방향 운동이 없을 경우에 C는 시불변상수가 된다.

$$\begin{aligned} \alpha(t) &= \frac{\sum_{i=1}^8 m_i(\ddot{z}_i + G_z)(x_i - x_{ZMP}) - m_i(\ddot{x}_i + G_x)z_i}{m_0 z_0} \\ &\quad - \frac{(\ddot{z}_0 + G_z)x_{ZMP}}{z_0} - G_x \\ \beta(t) &= \frac{\sum_{i=1}^8 m_i(\ddot{z}_i + G_z)(y_i - y_{ZMP}) - m_i(\ddot{y}_i + G_y)z_i}{m_0 z_0} \\ &\quad - \frac{(\ddot{z}_0 + G_z)y_{ZMP}}{z_0} - G_y \\ C &= \frac{(\ddot{z}_0 + G_z)}{z_0} \end{aligned} \quad (3)$$

1. 서 론

현재 보행로봇에 관한 연구는 인간과 유사한 다리구조를 가지는 이족보행로봇과 일반적인 포유류와 같은 사족보행로봇 그리고 곤충 형태의 다족보행로봇 등에 대해 다양한 연구가 진행 중이다. 이족보행로봇의 걸음새에 관한 연구는 다리 관절만으로 안정도를 구현하는 연구와 다리 관절의 걸음새에 따라 별도의 독립된 균형관절의 움직임을 결정하는 연구로 나눌 수 있는데[1][2], 본 논문은 자체 제작한 이족보행로봇을 이용하여 다리관절에 의한 다양한 걸음새에 대해 균형관절로 보상 모멘트를 발생시켜 안정도를 해석하며[3][4], 이족보행로봇의 균형점이 안정 영역 내부에 위치하도록 균형관절 제어 방정식을 이용하여 균형점의 움직임을 결정하고 균형점 검정 방정식으로 이족보행로봇의 안정도를 판별한다[5]-[8].

본 연구에서는 기존의 사다리꼴 궤적 걸음새와 제한된 삼각형 궤적 걸음새의 보행 안정성을 최적화 하는 목적지표를 정의하고, 각각의 걸음새 및 다리부와 균형추에 유전 알고리즘을 적용하여 최적화 시킨다.

2. 이족보행로봇 시스템

2.1 균형점 해석과 균형 관절 제어 방정식

이족보행로봇의 걸음새 분석과 안정도 해석을 위한 동역학적 해석은 D'Alambert 원리에 의한 모멘트 운동 방정식을 정리하여 다음의 균형점 검증 방정식을 유도한다.

$$\begin{aligned} x_{ZMP} &= \frac{\sum_{i=0}^8 m_i(\ddot{z}_i + G_z)x_i - \sum_{i=0}^8 m_i\ddot{x}_i z_i}{\sum_{i=0}^8 m_i(\ddot{z}_i + G_z)} \\ y_{ZMP} &= \frac{\sum_{i=0}^8 m_i(\ddot{z}_i + G_z)y_i - \sum_{i=0}^8 m_i\ddot{y}_i z_i}{\sum_{i=0}^8 m_i(\ddot{z}_i + G_z)} \end{aligned} \quad (1)$$

식 (1)은 균형점 x_{ZMP} , y_{ZMP} 을 구하는 식으로 m_i 는 각 링크의 질량과 x_i , y_i , z_i 는 각 질점의 위치성분을 나타내며, \ddot{x}_i , \ddot{y}_i , \ddot{z}_i 는 각 질점의 가속도 성분이고 G_z 는 중력가속도를 나타낸다. 따라서 이를 이용하여 균형점의 X-Y좌표 평면상의 위치와 이족보행로봇의 지지각으로 이루어진 다각형과의 상관관계로써 안정성을 관측 할 수 있다.

2.2 전체 시스템 구성

이족보행로봇의 전체 시스템 구성은 그림 1과 같이 다양한 보행이 가능한 8자유도 이족보행로봇과 각 관절을 구동시키기 위한 AC 서보 모터/드라이브, 8축 동시 제어기 그리고 모의실험기 등으로 구성된다.

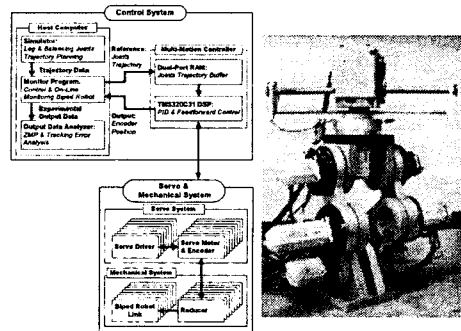


그림 1. 이족보행로봇 시스템

이족보행로봇은 2개의 3자유도를 가지는 다리와 ZMP를 보상하여 안정적인 보행을 하기위한 2자유도의 균형추로 구성된다. 또한 모의실험기는 다리체적과 목적균형점을 입력받아 식 (2)의 균형추 움직임을 결정하기 위한 유한 차분법을 이용하며, 지지각과 유각의 궤적은 4계 또는 3계의 경유점으로 5차 다항식이 사용된다.

2.3. 유전 알고리즘

유전 알고리즘은 자연의 진화 현상에 기초한 모델로서, 자연 선택의 원리와 자연계의 생물 유전학에 기본 이론을 둔 병렬적이고 전역적인 탐색 알고리즘이다. 유전 알고리즘은 모든 생물은 주어진 다양한 환경 속에 적응함으로써 살아남는다는 Darwin의 적자생존(survival of the fittest)의 이론을 기본 개념으로, 재생산, 교배, 돌연변이를 거쳐서 다음 세대의 새로운 자손을 인공적으로 생성함으로써 세대를 거치는 동안 진화한다는 알고리즘이다.

2.4. 걸음세 최적화

사다리꼴 궤적의 이족보행로봇 걸음세는 0.0초, 2.0초, 2.5초, 3.0초의 4개 경유점에서의 위치를 결정하고, 각 경유점에서의 속도와 가속도는 에너지를 최소화하는 목적함수의 유전 알고리즘을 사용하여 결정한다. 또한 삼각형 궤적의 이족보행로봇 걸음세는 0.0초, 1.5초, 3.0초의 3개 경유점을 사용한다. 이때 사용된 유전알고리즘의 매개변수는 아래 표 1과 같다.

표 1. 다리 관절의 유전 알고리즘의 매개 변수 값

Parameter	Value
Population	50
Generation	50
String length	40bit,30bit
Crossover Rate	0.3
Mutation Rate	0.3
Gene Number	2
Fitness function	$f = \frac{1}{\sum (a_{i+1} - a_i)^2}$

이족보행로봇의 안정적인 보행을 하기위한 균형추의 움직임은 유한차분법으로 결정할 수 있고 또한 유전 알고리즘을 이용하여 결정할 수 있다. 기존의 유한차분법은 지지각과 유각 그리고 목표 균형점을 이용하여 균형추 움직임을 결정한 후 보행로봇의 기구적 제약 조건으로 조절하여 실제 균형추의 움직임과 실제균형점의 궤적을 도출하였다. 여기에 유전 알고리즘을 적용하여 사다리꼴 걸음세와 삼각형 걸음세의 각 경유점과 균형추의 경유점을 정의하여 균형추의 회전관절과 직진관절의 움직임을 최소로 하는 균형추의 궤적을 도출한다. 표 2는 균형추의 5차 다항식 경유점을 결정하기 위한 유전알고리즘의 매개변수이다.

표 2. 균형 관절의 유전 알고리즘의 매개 변수 값

Parameter	Value
Population	50
Generation	50
String length	40bit
Crossover Rate	0.3
Mutation Rate	0.3
Gene Number	4
Fitness function	$\frac{\text{구간당회전각}}{\text{전체회전가능각}} + \frac{\text{구간당이동거리}}{\text{전체이동가능거리}}$

2.5. 모의실험

모의실험은 사다리꼴 걸음세와 삼각형 걸음세에 대하여 유전 알고리즘을 적용하여 비교한다. 먼저, 각 걸음세에 대하여 유전 알고리즘을 사용하지 않고, 경유점에서의 평균 속도와 제로 가속도로 기존의 유한차분법으로 모의 실험한다. 두 번째로 표 1의 매개변수로 유전알고리즘을 다리 궤적에만 적용한 모의실험을 하고 세 번째로 균형추의 움직임을 결정하기 위한 유전 알고리즘을 표 2의 매개변수로 수행한다. 마지막으로 다리궤적과 균형추의 움직임 모두 유전 알고리즘을 적용하여 모의 실험한다.

그림 2는 사다리꼴 걸음세의 목표 균형점과 실제 균형점의 보행 진행방향 X축과 Y축의 모의실험 결과를 나타낸다. 이때 다리부에만 유전 알고리즘을 적용한 경우 유한차분법보다 실제 균형점의 Y방향 궤적의 진동이 감소함을 볼 수 있고, 균형추의 움직임에 대하여 유전 알고리즘을 적용한 경우, 다른 경우와 비교하여 실제 균형점의 Y방향 궤적 추종성이 높아진 것을 볼 수 있다.

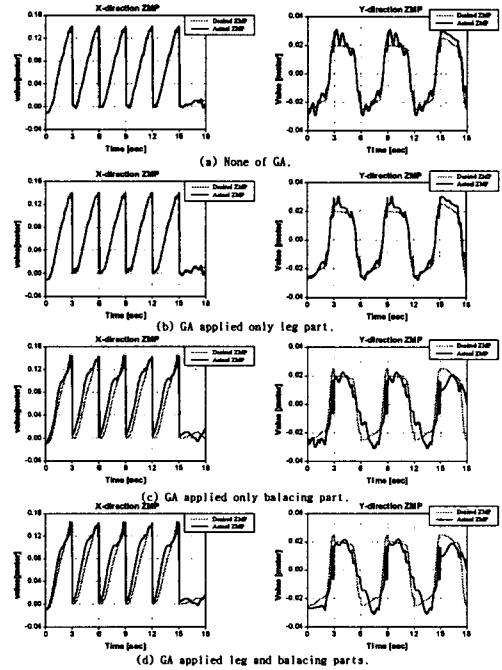


그림 2. 사다리꼴 걸음세의 균형점 궤적비교

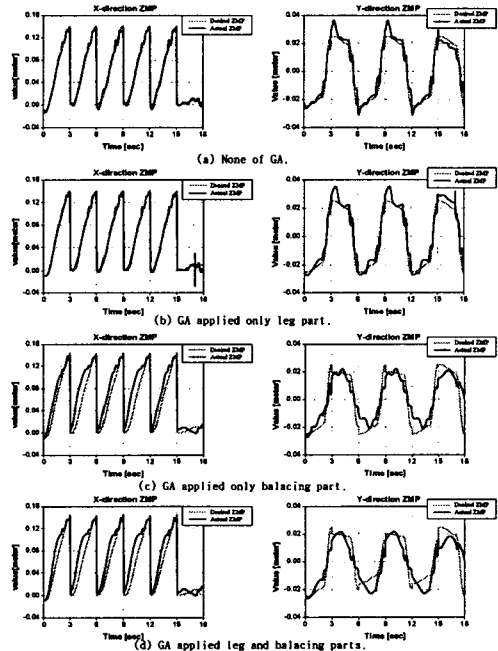


그림 3. 삼각형 걸음세의 균형점 궤적비교

그림 3은 삼각형 걸음새의 목표 균형점과 실제 균형점의 보행 진행방향 X축과 Y축의 모의실험 결과를 나타낸다. 그림 3의 (b)의 다리부에만 유전 알고리즘을 적용한 경우 (a)보다 실제 균형점의 Y방향 궤적의 연속성이 증가함을 볼 수 있고, (c)와 (d)의 균형추에 대한 유전 알고리즘을 적용한 경우, (a), (b)와 비교하여 실제 균형점의 Y방향 궤적 추종성이 높아진 것을 볼 수 있다.

2.6 실험

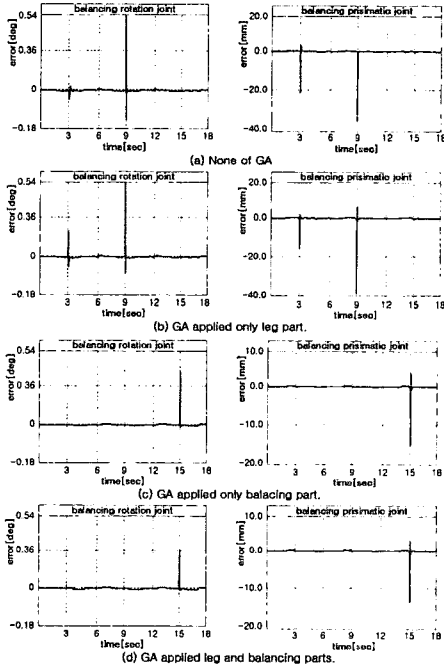


그림 4. 삼각형 걸음새의 보행실험 오차

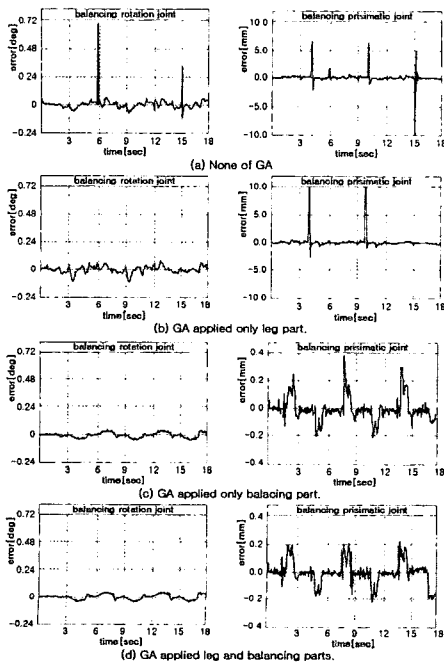


그림 5. 삼각형 걸음새의 보행실험 오차

그림 4는 사다리꼴 걸음새를 이족보행로봇으로 실험한 결과로써 균형추의 회전관절과 직진관절의 위치 추종오차를 나타낸다. (c)와 (d)의 회전관절과 직진관절은 유전알고리즘을 균형추의 움직임에 적용했을 때, (a)와 (b)의 경우보다 약 50%의 오차 감소를 보인다. 그림 5는 삼각형 걸음새를 실험한 결과로써 (b), (c)와 (d)의 회전관절은 유전알고리즘을 균형추의 움직임에 적용했을 때, (a)의 경우보다 약 80%의 오차 감소를 보인다. 또한 직진관절은 50% 가량의 오차 감소를 볼 수 있다. 그림 4와 5를 비교하면, 삼각형 걸음새가 사다리꼴 걸음새보다 균형추의 직진관절의 위치 추종오차가 상대적으로 많은 감소를 나타내는데, 이는 상대적으로 적은 다리관절들의 이동량에 원인하다고 분석된다.

3. 결론 및 향후과제

이족보행로봇의 삼각형 걸음새는 사다리꼴 걸음새보다 감소된 궤적추종오차를 나타냄을 실험결과 알 수 있었다. 또한 극부적으로 다리관절이나 균형추의 움직임에 대하여 개별적으로 유전 알고리즘을 적용하는 것보다 전체적으로 유전 알고리즘을 적용하는 것이 목표 및 실제 균형점의 궤적 추종과 실제 각 관절의 궤적 추종이 개선됨을 실험결과 확인할 수 있었다.

향후 사다리꼴 걸음새는 장애물 회피와 경사 및 계단보행에 적용하고, 삼각형 걸음새는 평지 고속보행에 적용하고자 한다.

[참고 문헌]

- [1] M. Vukobratovic and J. Stepanenko, "Legged Locomotion Robot," Nikkan Kogyo Shinbunsha, 1975.
- [2] A. Takanishi, M. Ishida, Y. Yamazaki and I. Kato, "The Realization of Dynamic Walking by the Biped Walking Robot WL-10RD," Journal of the Robotics Society of Japan, Vol. 3, no. 4, pp. 325-336, 1985.
- [3] C. L. Shin, Y. Z. Li, S. Chung, T. T. Lee and W. A. Gruven, "Trajectory Synthesis and Physical Admissibility for a Biped Robot During the Single Support Phase," IEEE, pp.1646-1650, 1990.
- [4] S. H. Lim and J. G. Kim, "Development of Adaptive Gait Algorithm for IWR Biped Robot," KACC, pp. 113-118, 1993.
- [5] A. Takanishi, Y. Egusa, M. Tochizawa, M. Takeya and I. Kato, "Realization of Dynamic Biped Walking Stabilized with Trunk Motion," RoManSy 7:Proc, Seventh CISM-IFTToMM Symposium on Theory and Practice of Robots and Manipulators, Eds. Hermes, Paris, pp. 68-79, 1990.
- [6] S. Kagami, F. Kanehiro, Y. Tamiya, M. Inaba and H. Inoue, "Autobalancer: An online Dynamic Balance Compensation Scheme for Humanoid Robots," Proc. of Fourth Intl. Workshop on Algorithmic Foundations on Robotics (WAFR'00), pp. 79-89, 2000.
- [7] Katja D. Mombaur, Hans Georg Bock and Johannes P. Schoder, "Human-Like Actuated Walking that is Asymptotically Stable Without Feedback," Proc. of the 2001 IEEE Int. Conf. on Robotics & Automation, pp. 4128-4133, 2001.