

이족보행로봇의 최적 걸음새에 관한 연구

공정식[#], 노경곤^{*}, 김진걸^{**}

A Study on the Gait Optimization of a Biped Robot

Jung Shik Kong [#], Kyung-Gon Noh ^{*} and Jin-Geol Kim^{**}

ABSTRACT

This paper deals with the gait optimization of via points on biped robot. ZMP(Zero Moment Point) is the most important index in a biped robot's dynamic walking stability. To stable walking of a biped robot, leg's trajectory and a desired ZMP trajectory is required, balancing motion is solved by FDM(Finite Difference Method). In this paper, optimal index is defined to dynamically stable walking of a biped robot, and genetic algorithm is applied to optimize gait trajectory and balancing motion of a biped robot. By genetic algorithm, the index of walking parameter is efficiently optimized, and dynamic walking stability is verified by ZMP verification equation. Genetic algorithm is only applied to balancing motion, and is totally applied to whole trajectory. All of the suggested motions of biped robot are investigated by simulations and verified through the real implementation.

Key Words : biped robot(이족보행로봇), ZMP(균형점), balancing motion(균형 운동), gait trajectory(걸음새 궤적), genetic algorithm(유전 알고리즘)

1. 서론

현재 보행로봇에 관한 연구는 인간과 유사한 다리구조를 가지는 이족 보행과 ¹ 일반적인 포유류와 같은 사족보행 ² 그리고 곤충의 형태인 다족 보행에 관한 연구가 활발히 진행 중이다 ³. 이족 보행 로봇의 걸음새에 관한 연구는 다리 관절만으로 안정도를 구현하는 연구와 ^{4,5} 다리 관절의 걸음새에 따라 별도의 독립된 균형관절의 움직임을 결정하는 연구로 나눌 수 있다. ⁶ 본 논문은 여유 자유도의 균형관절을 가지고 있는 자체 제작한 이족 보행 로봇을 이용하여 다리관절에 의한 다양한 걸음새에 대해 균형관절로 보상 모멘트를 발생시

켜 안정도를 해석하며 ⁷⁻⁹, 이족 보행 로봇의 보행상의 안정화 요소인 균형점(ZMP; Zero Moment Point)이 안정 영역 내부에 위치하도록 균형관절을 제어하여 균형점의 움직임을 결정하고 ¹⁰⁻¹² 균형점 검정 방정식으로 이족 보행 로봇의 안정도를 판별한다 ^{13,14}.

본 논문에서는 이족보행로봇의 안정성 해석에 기초가 되는 ZMP 를 유전 알고리즘을 이용하여 안정영역 내에 위치시키면서 보행 중에 발생하는 충격량을 줄이고, 보다 유연한 보행을 수행하고자 한다. 기존 유전 알고리즘의 적용방법은 균형관절에 국한 되어 균형추의 움직임을 최적화 하였다. 그러나 보다 유연한 보행을 유지하기 위해서는 균

^{1#} 접수일: 2003년 6월 27일; 게재승인일: 2004년 2월 20일
교신저자, 인하대학교 자동화공학과
Email tempus@dreamwiz.com Tel.(032) 860-7384
* 인하대학교 자동화공학과
** 인하대학교 전자전기공학부

형관절의 움직임을 부드럽게 하는 것과 더불어 다리관절의 움직임을 보다 부드럽게 해야 한다. 이에 본 논문에서는 유전 알고리즘을 이용하여 로봇의 균형관절과 다리 관절의 움직임을 부드럽게 함으로서 안정적이고 유연한 보행을 할 수 있도록 하고, 이에 대해 시뮬레이션과 실험을 통해 안정적인 보행을 검증하였다.

2. 이족보행로봇 시스템

2.1 전체 시스템구성

본 논문에서는 자체 개발한 이족보행로봇을 이용하였다. 이족보행로봇의 전체 시스템 구성은 Fig. 1 과 같이 양쪽 다리와 균형 관절로 구성된 8 자유도의 이족보행로봇과 각 관절을 구동 시키기 위한 AC 서보 모터/드라이브, 8축 동시 제어기 그리고 모의실험기 등으로 구성된다.

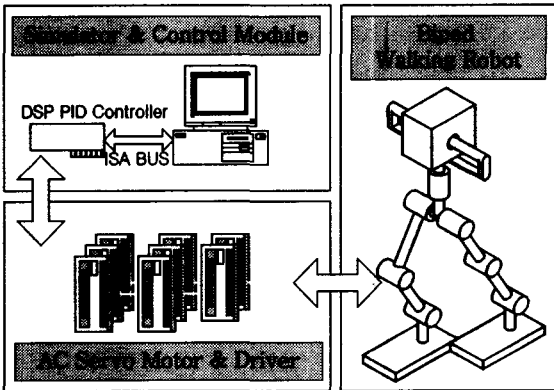


Fig. 1 Biped robot system

2.2 이족보행로봇의 기구 및 좌표계 구성

이족보행로봇의 기구부는 Fig. 2 와 같이 크게 양쪽다리와 보행의 균형을 맞추기 위한 균형관절로 구성된다. 각 다리는 3 자유도로 발목, 무릎, 허벅지의 회전관절로 구성되며 허리 회전관절과 직진 균형 관절로 총 8 자유도를 가진다. 각 관절의 설정은 그림 2 와 같이 $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ 은 왼쪽 다리의 발목, 무릎, 대퇴부 회전관절을 나타내고, $\theta_4, \theta_5, \theta_6$ 은 오른쪽 다리의 발목, 무릎, 대퇴부 회전관절을 나타낸다. 또한 θ_7 은 균형 회전 관절이며 θ_8 은 균형 직진관절을 나타낸다. 전체 기준 좌표계는 이족보행로봇의 전면 진행 방향으로 X 축을 정의하며 지면의 수직인 방향을 Z 축으로 정의한다.

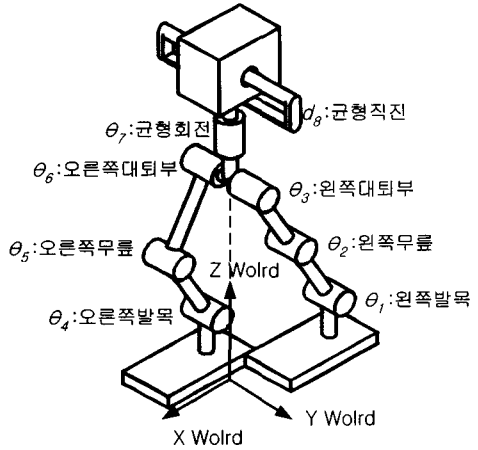


Fig. 2 Definitions of world and joint coordinates

각 관절은 이족 보행 걸음새 구현에 요구되는 힘을 구동하기 위해 1 회전 당 10000 펄스의 해상도를 가지는 200W AC 서보 모터와 60:1 의 감속기를 사용하였다. 가장 많은 힘이 요구되나 상대적으로 저속인 발목 관절은 100:1 의 감속기가 사용되고, 고용량의 힘과 고속의 운동이 요구되는 무릎 관절은 400W 용량의 모터를 사용하였으며 무 동력 시 기존 자세의 유지를 위해 브레이크가 장착되었다.

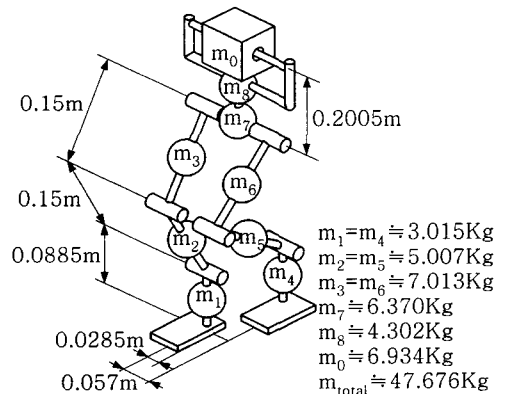


Fig. 3 Mass and length of each linkages

2.3 균형점 해석과 균형 관절 제어 방정식

이족 보행 로봇의 걸음새 분석과 안정도 해석을 위한 동역학적 가정은 첫째, 각 링크의 하중은 링크의 무게중심에 집중되어 있으며 해석상 9 개의

무게 중심을 갖는 질량중심으로 가정한다. 둘째, 지지평면은 수직항력 이외에 인위적인 외력이나 외부 모멘트에 의해 영향을 받지 않는다. 그러나 수직항력은 안정적 보행 수행 중에는 중력에 상쇄되므로 고려하지 않는다. 셋째, 지지평면과 발바닥 사이의 미끄러짐은 일어나지 않는다. 따라서 다리의 움직임과 균형관절의 움직임으로 인한 몸체의 회전은 고려되지 않았다. 위의 가정과 D'Alambert 원리에 의한 모멘트 운동 방정식을 정리하여 식(1)과 같은 균형점 검증 방정식을 유도한다.

$$x_{zmp} = \frac{\sum_{i=0}^8 (M_i(\ddot{z}_i + G_z)x_i - M_i\ddot{x}_iz_i)}{\sum_{i=0}^8 M_i(\ddot{z}_i + G_z)} \quad (1)$$

$$y_{zmp} = \frac{\sum_{i=0}^8 (M_i(\ddot{z}_i + G_z)y_i - M_i\ddot{y}_iz_i)}{\sum_{i=0}^8 M_i(\ddot{z}_i + G_z)}$$

식(1)에서 x_{zmp} , y_{zmp} 는 균형점 좌표를 나타내고 M_i 는 i 번째 질점의 질량을 나타내며, \ddot{x}_i , \ddot{y}_i , \ddot{z}_i 는 각 질점에서의 선가속도 성분을 나타낸다. 또한 G_z 는 중력 가속도 벡터를 의미한다. 식(1)으로부터 균형관절의 균형방정식을 유도하였다.

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

$$\ddot{y}_0(t) - \frac{(\ddot{z}_0 + G_z)}{z_0} y_0(t) = \beta(t)$$

$$\alpha(t) = \frac{\sum_{i=1}^8 m_i(\ddot{z}_i + G_z)(x_i - x_{zmpD}) - m_i\ddot{x}_iz_i}{m_0z_0} - \frac{(\ddot{z}_0 + G_z)x_{zmpD}}{z_0} \quad (2)$$

$$\beta(t) = \frac{\sum_{i=1}^8 m_i(\ddot{z}_i + G_z)(y_i - y_{zmpD}) - m_i\ddot{y}_iz_i}{m_0z_0} - \frac{(\ddot{z}_0 + G_z)y_{zmpD}}{z_0}$$

여기서 M_0 는 균형추(balancing weight)의 질량, x_0, y_0, z_0 는 기준 좌표계에 대한 균형추의 질량 중심 위치, x_{zmpD}, y_{zmpD} 는 기준 좌표계에 대한 목표 균형점의 위치, 그리고 $\ddot{x}_0, \ddot{y}_0, \ddot{z}_0$ 는 기준 좌표계에 대한 균형추의 질량 중심 가속도를 나타낸다. 이차 미분방정식으로 표현되는 균형 방정식을 이용하여 균형 관절의 움직임을 결정하고 균형점

검증 방정식으로 보행 안정도 여부를 판별한다.

3. 유전 알고리즘

3.1 유전 알고리즘

유전 알고리즘은 진화 현상에 기초한 계산 모델로써 병렬적이고 전역적인 탐색 알고리즘이며 주어진 다양한 환경 속에서 적응하여 적합한 것만이 살아 남는다는 적자생존의 이론을 기본으로 한 알고리즘이다. 유전 알고리즘은 생물학적 유전자인 염색체에 대항하는 문자열을 가지고 생물과 같은 재생산, 교배, 돌연변이를 거쳐서 다음 세대로 새로운 자손을 인공적으로 만들어낸다. 유전 알고리즘은 가능한 해들을 정해진 형태의 자료 구조로 표현한 다음 이들을 점차적으로 변형함으로써 점점 더 좋은 해들을 만들어낸다.

유전 알고리즘은 미분 방정식적인 접근이 아닌 대수적인 접근으로 최적 해를 구할 수 있는 알고리즘으로 해석상의 난해성과 계산상의 복잡성을 해결하면서 최적 근사 해를 생성해 낼 수 있는 알고리즘이다.

3.2 유전 알고리즘의 적용

유전 알고리즘을 적용함에 있어서 먼저 상체 부분에 유전 알고리즘을 적용한 것과 전체적으로 유전 알고리즘을 적용하였을 때 각각의 움직임의 최적화 경향을 연구하였다. 상체의 균형관절에 적용하였을 때의 균형 관절의 움직임을 최적화 할 수 있는 적합도 함수를 사용하였다. 상체에 유전 알고리즘을 적용한 경우 상체부만을 해석하였기 때문에 국부적인 움직임만을 유도할 수 밖에 없는 단점을 가지고 있었다. 그래서 이에 대해 새로이 적용된 유전 알고리즘은 상체부의 움직임만을 생성하는 것 뿐만 아니라 다리부에도 유전알고리즘을 적용하여 다리부와 상체부 모두에 최적의 움직임을 생성 함으로써, 보다 유연한 보행을 유도할 수 있도록 하였다.

이 논문에서는 유전 알고리즘을 궤적 계획 시 각 관절의 움직임을 최소화 할 수 있도록 하기 위해서 궤적 생성 시 결정해야 할 중간 경유정보 중 속도와 가속도를 결정하는 부분에 유전 알고리즘을 사용하여 로봇의 움직임을 최소화 할 수 있도록 하였다. Table 1 은 이때의 유전 알고리즘의 각각의 매개 변수이다.

Table 1 Parameters of genetic algorithm

Parameter	Value
Population	50
Generation	50
Crossover Rate	0.9
Mutation Rate	0.3
Fitness Function	$f_1 = 1 / \sum \{ (\Delta v_i)^2 + (\Delta a_i)^2 \}$

Table 1 에서 Δv_i 와 Δa_i 는 각 관절의 속도 가속도의 변화량을 의미한다. 유전 알고리즘 적용 시 각 관절의 속도와 가속도의 움직임을 최소화 할 수 있도록 경유 정보를 결정하여 줌으로써 로봇의 기계적 충격량(Jerk)이 줄어든 움직임을 결정할 수 있었다. 유전 알고리즘은 PC 상에서 MATLAB 을 이용하여 수행하였다. 이때 유전 알고리즘은 이진 알고리즘을 사용하였고 Crossover Rate 를 0.9 로 하고 mutation Rate 를 0.3 으로 하였을 때 가장 최적 값 추정이 가장 잘 일어남을 알 수 있었다. 그리고 세대는 35 세대 이후에 유전 알고리즘이 최적 값에 거의 추종하였고 한 세대 연산량이 많기 때문에 50 세대로 한정하였다.

Fig. 4 는 기존 알고리즘과 새로이 적용된 알고리즘 사이의 순서도 비교이다. 기존의 방법은 다리부의 움직임을 경유점에서 평균값을 이용하여 경유점을 생성한 이후 이렇게 생성된 다리부의 움직임과 더불어 균형관절의 움직임을 유전알고리즘을 이용하여 최적의 움직임을 생성함으로써, 부드러운 균형관절의 움직임을 유도하였다.

제안된 알고리즘은 다리부 궤적 생성 시 유전알고리즘을 이용하여 경유점의 최적 정보를 유추해내고, 균형관절 해석 시에도 유전 알고리즘을 통해 최적의 균형관절 움직임을 구현 함으로써 로봇의 움직임을 전역적으로 해석하고 보행을 보다 원활하게 할 수 있도록 하였다.

4. 모의실험

모의 실험기는 MATLAB 6.0 을 통해 작성하였고, 단위 걸음 당 3 초, 한 보폭 당 14 cm 로 6 보 보행을 수행하였다. 모의 실험은 균형관절의 움직임에 대하여 기존의 FDM(Finite Difference Method)을 사용하여 균형추의 움직임을 결정한 방법과 유전 알고리즘을 적용한 방법을 수행한다.

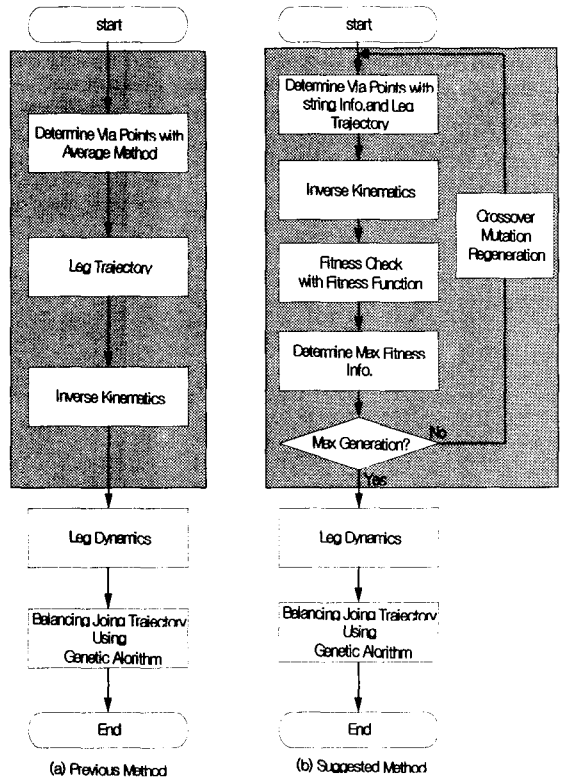


Fig. 4 Comparison with previous and suggested method

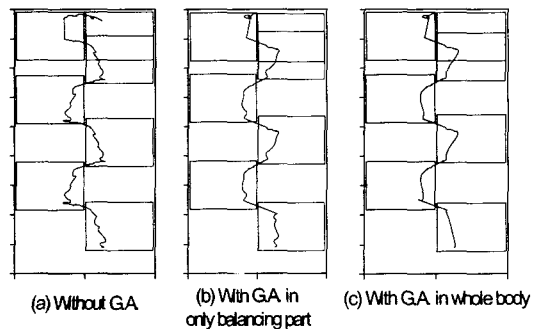


Fig. 5 ZMP trajectory

기존 FDM 방법은 각 단위걸음 당 경유점에서의 평균속도를 사용하여 지지각과 유각의 보행궤적을 생성하였고, 목표 ZMP 궤적생성시에도 같은 방법을 사용하였다. 이에 반해 유전 알고리즘은 균형관절과 다리관절의 움직임을 결정하는 경유점 데이터를 충격량과 운동에너지를 최소화하는 최적

해를 구하는데 사용하였다. 각 보행 시 경유점은 총 4 개이고 이때 경유점의 속도 가속도를 유전 알고리즘을 통해 구현하였다.

Fig. 5 는 기존 방법과 유전 알고리즘을 균형관절에만 적용했을 경우, 그리고 보행로봇 전반에 적용했을 때 각각의 ZMP 궤적을 나타낸다. Fig. 5 의 (a)는 기존의 FDM 방법으로 실제 ZMP 의 궤적을 나타내는데, 유전알고리즘을 적용하지 않았기 때문에 로봇의 움직임 상의 충격량이 존재하므로 그 충격에 의해 로봇의 ZMP 의 움직임이 원활하지 못함을 볼 수 있다. Fig. 5 의 (b)는 유전알고리즘을 균형관절에만 적용 했을 시 ZMP 궤적을 나타낸다. (a) 경우와 비교 해서 균형 관절의 움직임에 의한 충격이 줄어들었기 때문에 ZMP 의 움직임이 (a) 에 비해 좌우 방향 이동이 다소 감소함을 알 수 있다. Fig. 5 의 (c)는 유전 알고리즘을 보행로봇 전체에 적용한 경우 ZMP 궤적인데, (a)와 (b)에 비하여 상대적으로 보행 시 적은 충격으로 인한 ZMP 의 변화량이 많이 감소한 것을 볼 수 있다.

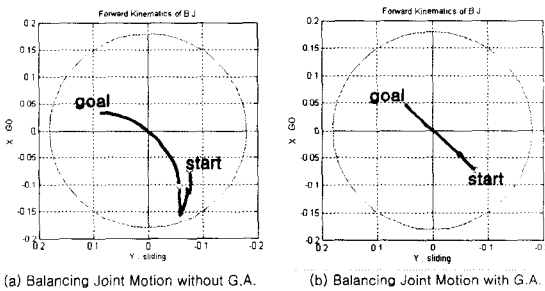


Fig. 6 Balancing joint motion

Fig. 6 의 (a)는 기존의 FDM 방법을 사용하여 목표 ZMP 와 다리부의 궤적으로 균형관절의 궤적을 얻어낸 결과이고, (b)는 유전알고리즘을 사용하여 균형관절의 궤적을 결정한 그래프인데, (b)에서 유전 알고리즘을 이용한 경우 균형 관절의 움직임이 안정 영역 내에서 균형 관절의 움직임이 같은 시간당 위치, 속도, 가속도의 값이 줄어들었고 이에 균형 관절의 움직임이 부드럽게 움직임을 볼 수 있어서 기존의 방법 (a)와 비교하여 균형관절의 운동이 최적화 되었음을 알 수 있다

Fig. 7 은 18 초간의 각 관절의 위치 궤적을 나타낸다. Fig. 7 의 (a)는 왼쪽 다리관절의 발목을, (b)는 무릎을 나타내고 (c)는 허벅지관절의 위치 궤적을

나타낸다. Fig. 7 의 (d)와 (e)는 균형관절의 회전관절과 직진관절을 각각 나타내며, 그래프의 연한 회색은 기존 방법에 의한 궤적이고, 검정색은 유전알고리즘을 적용한 궤적을 나타낸다.

Fig. 7 의 (a)는 기존의 방법보다 제안된 유전알고리즘의 방법이 위치궤적을 다소 감소시키는 것을 보이며, (b)와 (c)에서는 다소 증가된 양상을 나타낸다. 그러나 (d)와 (e)에서 나타나 듯이 균형관절의 움직임은 유전 알고리즘을 사용했을 경우 상당히 감소 됨을 알 수 있다.

Fig. 8 은 18 초 6 보 보행간의 각 관절 속도를 나타내는데, 위치궤적과 유사하게 (b)의 무릎관절은 속도가 다소 증가되고 (c)의 엉덩이 관절은 다소 감소함을 알 수 있다. 반면에 (d)와 (e)의 균형관절 속도는 기존 방법보다 상당히 감소 됨을 그래프를 통하여 확인 할 수 있다.

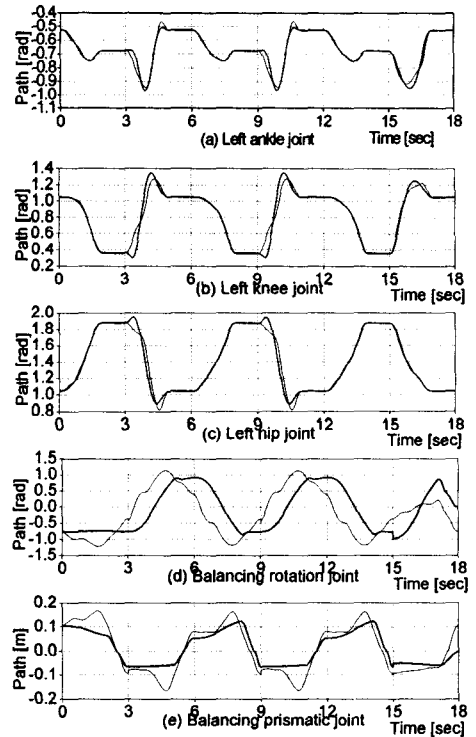


Fig. 7 Position trajectory of each joint

또한 균형관절의 속도 변화 역시 기존 방법보다 유전알고리즘을 적용한 경우 상당히 감소된다. Fig. 9 는 각관절의 가속도 궤적을 기존방법과 유전알고리즘을 사용한 경우 비교한 것이다.

Fig. 9 의 (a)는 왼쪽발목의 가속도 궤적을 나타내는데, 4.5 초와 10.5 초 시간에 유전알고리즘을 사용한 궤적의 가속도가 감소됨을 볼 수 있다. 또한 16 초에서 17 초 사이에 가속도 역시 감소하고, (c)는 허벅지 관절의 가속도 궤적을 나타내는데, 3.5 초에서 5 초 사이와 9.5 초에서 11 초 사이에 가속도 값이 감소됨을 볼 수 있다.

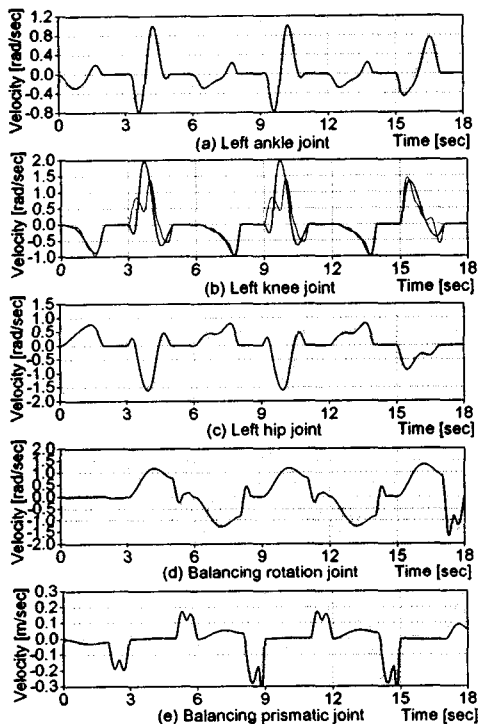


Fig. 8 Velocity trajectory of each joint

Fig. 9 의 (d)는 균형 회전관절의 가속도 궤적을 나타내며 전구간에 대하여 가속도가 감소되었을 뿐만 아니라 가속도의 변화량 또한 감소됨을 나타낸다. (e) 또한 균형 직전관절의 가속도 값이 기존보다 50% 가량 감소된다.

5. 보행 실험 및 결과

5.1 실험 시스템 구성

본 논문에 사용된 자체 제작된 이족 보행 로봇의 본체는 경량화를 고려하여 두랄루민을 사용하였고, 정확하고 안정적인 보행을 구현하기 위하여 각 관절에는 정밀 감속기와 AC 서보 모터를 이용

하였다. 그리고 다축 제어를 위해 TI 사의 TMS320c31 DSP 가 내장된 제어보드를 이용하였다. 이족 보행 로봇 시스템은 먼저 모의 실험기를 통해 주어진 궤적에 대해서 균형추가 균형점을 추종하는지의 여부를 판별하고 다음에 3 차원 가상 보행을 구현하는 3D 그래픽 모의실험기를 이용하여 시각적인 확인을 거친 후 실험과정을 행한다.

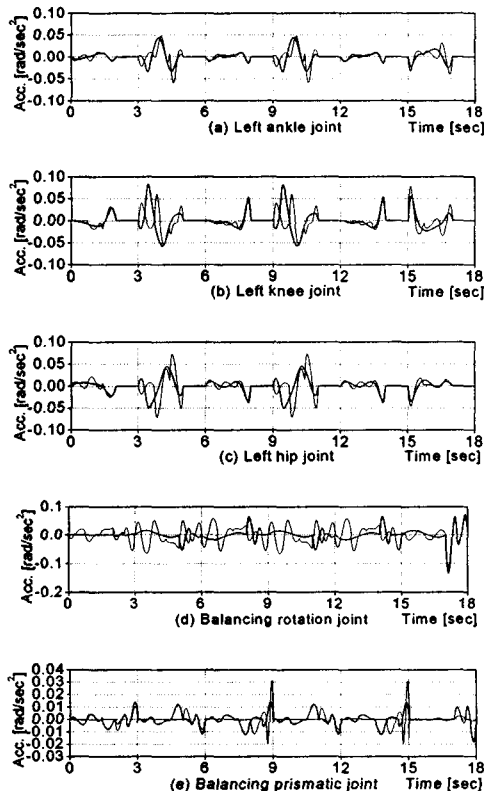


Fig. 9 Acceleration trajectory of each joint

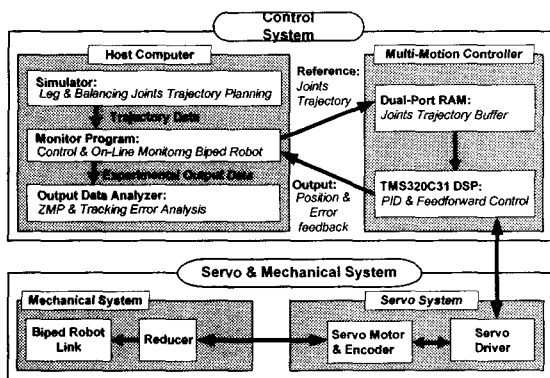


Fig. 10 Structure of experimental system

5.2 실험결과

Fig. 11 은 모의 실험 결과 보행 안정성이 검증된 궤적을 이족보행로봇으로 실험을 수행한 사진이다.

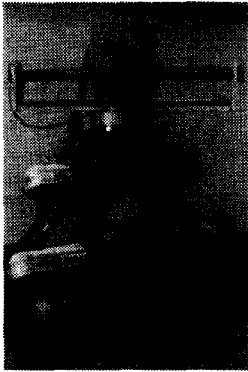


Fig. 11 Photo of a biped walking robot

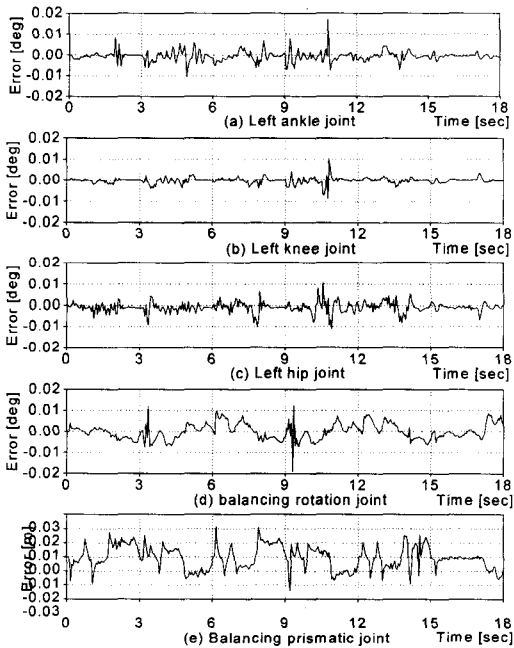


Fig. 12 Joint error without G.A.

Fig. 12 은 기존 FDM 을 사용한 실험결과 이다. Fig. 12 의 (a), (b), (c)는 왼쪽다리의 발목, 무릎, 허벅지 관절의 위치추종오차를 나타내고, (d)와 (e)는 균형회전관절과 균형직진관절의 오차량을 나타낸다.

Fig. 13 는 유전알고리즘을 균형관절에만 적용 한 경우 각 관절의 위치추종오차 값을 나타낸 그래프 이다. 기존 FDM 을 사용한 실험결과와 비교할 때, (a)와 (b)의 오차량이 상대적으로 감소하고, (d)의 균형회전관절의 오차 변화량이 다소 감소됨을 알 수 있다. 또한 (e)의 균형직진관절의 오차량은 크기가 감소됐을 뿐만 아니라 규칙적인 형태를 나타냄을 알 수 있다.

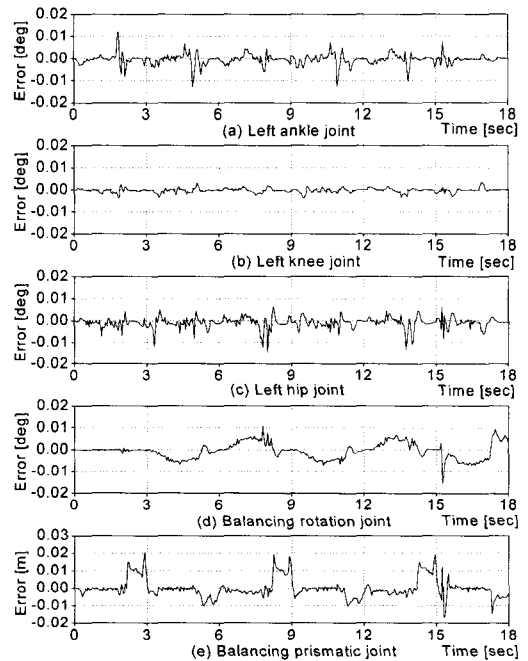


Fig. 13 Joint error with G.A in only balancing part

Fig. 14 은 유전알고리즘을 다리부와 균형관절 모두에 적용 한 경우 위치추종오차 값을 나타낸 그래프이다. (e)의 균형직진관절의 오차량이 다소 감소한 것만 제외하고, 유전알고리즘을 균형관절에만 국부적으로 적용한 경우와 유사한 실험결과가 도출됨을 볼 수 있는데, 이에 궤적추종오차의 주 발생원인으로 균형관절의 동작 임을 추정 할 수 있다.

6. 결론 및 고찰

본 논문은 이족 보행 로봇의 안정적인 걸음새를 생성하기 위한 방법으로 기존의 FDM 에 의한 방법과 유전알고리즘을 사용하여 각 방법을 모의 실

험과 실제 실험을 통하여 서로간의 장단점을 살펴 보았다. 또한 국부적으로 균형추의 움직임에 대하여 개별적으로 유전 알고리즘을 적용하는 것보다 전체적으로 유전 알고리즘을 적용하는 것이 균형점의 궤적과 실제 각 관절의 궤적 추종이 개선됨을 실험결과 확인 할 수 있었다.

향후 역진자 형태의 이족 보행 로봇 구현에 유전 알고리즘을 이용하여 비선형적인 보행 안정성을 해석 및 제어하기 위한 연구가 요구된다.

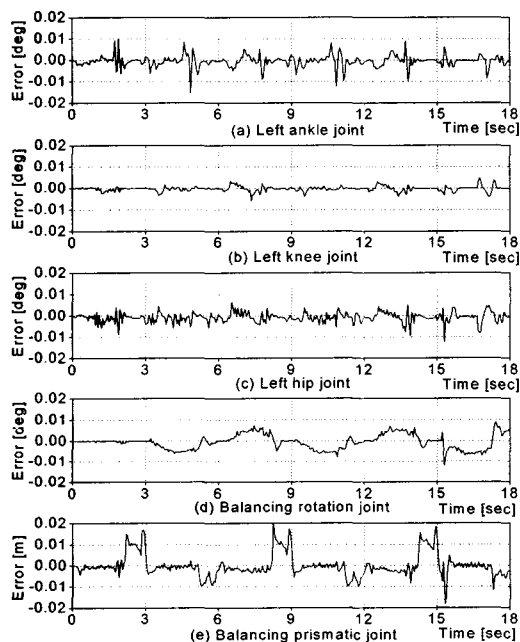


Fig. 14 Joint Error with G.A. in whole body

후기

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

참고문헌

1. Sakagami, Y., Watanabe, R., Aoyama, C., Matsunaga, S., Higaki, N. and Fujimura, K., "The intelligent ASIMO: System overview and integration," IEEE/RSJ International Conference, Vol. 3, pp.2478-2483, 2002.
2. Hornby, G. S., Takamura, S., Yokono, J., Hanagata,

- O., Yamamoto, T. and Fujita, M., "Evolving Robust Gaits with AIBO," IEEE Robotics and Automation, Vol. 3, pp.3040-3045, 2000.
3. Buschka, P., Saffiotti, A. and Wasik, Z., "Fuzzy Lankmark-Based Localization for a Legged Robot," IEEE/RSJ International Conference, Vol. 2, pp. 1205-1210, 2000.
4. Takanishi, A., Ishida, M., Yamazaki, Y. and Kato, I., "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.
5. Shin, L., Li, Y. Z., Chung, S. T., Lee, T. and Gruven, W. A., "Trajectory Synthesis and Physical Admissibility for a Biped Robot During the Single Support Phase," IEEE, pp.1646-1650, 1990.
6. Lim, S. H. and Kim, J. G., "Development of Adaptive Gait Algorithm for IWR Biped Robot," KACC, pp. 113-118, 1993.
7. Waldron, K. J., "Realization of Dynamic Biped Walking Stabilized with Truck Motion under Known External Force," Advanced Robotics, pp. 299-310, 1989.
8. Takanishi, A., Egusa, Y., Tochizawa, M., Takeya, M. and Kato, I., "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.
9. Yamaguchi, J., Takanishi, A. and Kato, I., "Development of a Biped Walking Robot Compensating for Three-axis Moment by Truck Motion," IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and System, pp. 561-566, 1993.
10. Park, Jong Hyeon and Kwon, Ohung, "Reflex Control of Biped Robot Locomotion on a Slippery Surface," Proceeding of IEEE Robotics and Automation, pp.4134-4139, 2001.
11. Hasegawa, Y., Arakawa, T. and Fukuda, T., "Trajectory generation for biped locomotion robot," Mechatronics, Vol. 10, pp.67-89, 2000.
12. Rodrigues, L., Prado, M., Tavares, P., Silva, K. and Rosa, A., "Simulation and control of Biped Locomotion - GA Optimization," IEEE Proc. Evolutionary Computation, pp.390-395, 1996.

13. Kim, Jin G., Noh, Kyung-gon and Park, Kiheon,
“Human-Like Dynamic Walking for a Biped Robot
Using Genetic Algorithm,” Springer, LNCS 2210,
pp.159-170, 2001.
14. Noh, Kyung G., Kong, Jung S., Kim, Jin G. and Kim,
Kisik, “Gait Implementation of a Biped Robot with
Smooth Walking Pattern,” Journal of the Korean
Society of Precision Engineering, Vol. 19, No. 7,
pp.43-50, 2002.