

## 지능 알고리즘 기반의 이족 보행로봇의 보행 구현

### A Gait Implementation of a Biped Robot Based on Intelligent Algorithm

노 경 곤\*, 강 찬 수, 김 진 걸  
(Kyung-Kon Noh, Chan-Soo Kang, and Jin-Geol Kim)

**Abstract :** This paper deals with a human-like gait generation of a biped robot with a balancing weight of an inverted pendulum type by using genetic algorithm. The ZMP (Zero Moment Point) is the most important index in a biped robot's dynamic walking stability. To perform a stable walking of a biped robot, a balancing motion is required according to legs' trajectories and a desired ZMP trajectory. A dynamic equation of the balancing motion is nonlinear due to an inverted pendulum type's balancing weight. To solve the nonlinear equation by the FDM (Finite Difference Method), a linearized model of equation is proposed. And GA (Genetic Algorithm) is applied to optimize a human-like balancing motion of a biped robot. By genetic algorithm, the index of the balancing motion is efficiently optimized, and a dynamic walking stability is verified by the ZMP verification equation. These balancing motion are simulated and experimented with a real biped robot IWR-IV. This human-like gait generation will be applied to a humanoid robot, at future work.

**Keywords :** biped robot, ZMP, balancing motion, inverted pendulum, FDM, genetic algorithm

#### I. 서론

인간과 유사한 관절 형태를 가지는 로봇에 관한 연구가 1970년대 이후부터 꾸준히 발전되고 있다[1][2]. 초기 연구는 하나의 다리 또는 둘 이상의 다리를 가지는 보행로봇의 안정된 보행을 구현하기 위한 연구에서 시작되었다[3-4]. 이에 인간과 같은 이족 보행의 안정성에 많은 연구가 진행되고 있으며 균형점(ZMP)의 보상 방식에 따라 크게 잉여 자유도에 의한 균형추의 균형운동 방법과 보행로봇의 특정 관절을 이용한 제어방법으로 연구가 이루어져 왔다[5-8]. 이러한 균형운동을 위한 균형추는 원통형 운동반경을 가지는 직진균형 관절 형태와 원구형 운동반경을 가지는 회전균형 관절 형태로 나뉜다[9-11]. 또한 최근에는 다양한 외부 환경 및 인간과의 공조 작업을 위한 유연하고도 안정된 보행 생성과 제어에 여러 연구가 진행 중이다.

본 논문은 자체 제작한 이족 보행로봇을 이용하여, 안정된 보행을 구현하기 위하여 다리 관절의 걸음새에 따라 별도의 독립된 원구형 균형추의 움직임을 균형점에 의거하여 수학적으로 모델링 한다[12-13]. 또한 균형점이 안정 영역 내부에 위치하도록 원구형 균형추의 운동 방정식을 이용하여 균형점의 움직임을 유한차분법 (FDM)을 이용하여 결정하고 균형점 검정 방정식으로 이족 보행로봇의 안정도를 판별한다. 이때 원구형 균형추 운동의 비선형성을 유전 알고리즘을 이용하여 인간과 유사한 형태의 부드러운 보행으로 보상한다. 본 논문은 이족 보행로봇의 전체 시스템 구성을 살펴보고 이에 따른 균형운동 방정식을 유도하며 유전 알고리즘의 적용방법을 설명한다. 또한 이를 모의실험과 실제 이족 보행로봇에

적용해 실험한다.

#### II. 이족 보행로봇 시스템

이족 보행로봇의 전체 시스템 구성은 양쪽 다리와 균형 관절로 구성된 8자유도의 이족 보행로봇과 각 관절을 구동시키기 위한 AC 서보 모터 및 드라이브, 8축 동시 제어기, 모의실험기 그리고 제어 프로그램으로 구성된다. 제어 시스템은 PC Windows 운영체제에 기반한 MMC(Multi Motion Controller)가 사용했으며 모의 실험기와 서보 제어 프로그램으로 구성된다. 독립 진자 형태의 균형추를 가지는 실제 이족 보행로봇의 사진은 그림 1과 같다.

원구형 균형관절의 독립 진자 균형추를 가지는 이족 보행로봇의 질량 모델과 좌표계 설정은 그림 2와 같이 설정한다. 그림 2의 (a)는 각 질점의 질량모델이며 (b)는 몸체 중심을

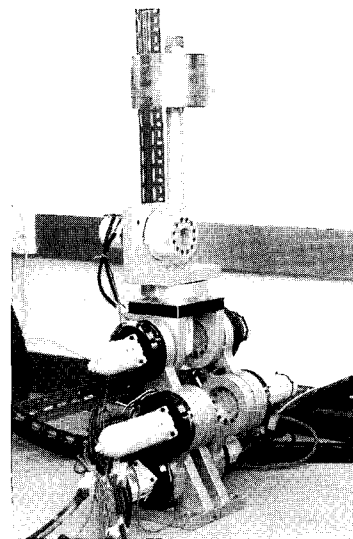


그림 1. 이족 보행로봇.  
Fig. 1. A picture of a biped robot.

\* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수 : 2004. 6. 1., 채택확정 : 2004. 8. 31.

노경곤, 강찬수 : 인하대학교 자동화공학과

(as900515@hotmail.com/cudas@dreamwiz.com)

김진걸 : 인하대학교 전자전기공학부(john@inha.ac.kr)

※ 본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(R01-2003-000-10364-0) 지원으로 수행되었습니다.

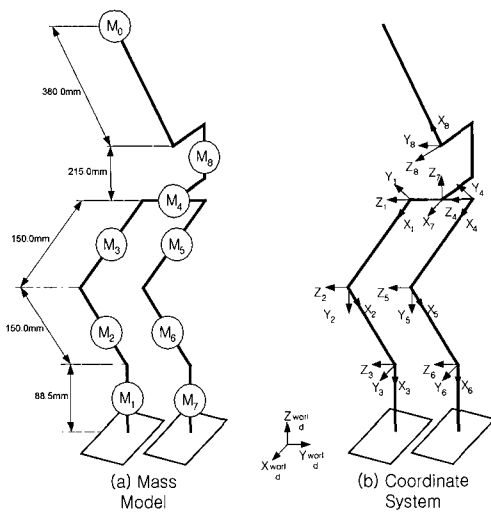


그림 2. 질량과 좌표계 시스템.  
Fig. 2. A mass model and a coordinate system.

기준으로 한 각 관절의 좌표계이다.

이족 보행로봇의 전체 높이는 약 983.5mm이며, 다리관절의 길이는 각각 150.0mm, 발목에서 발바닥까지의 거리는 88.5mm, 대퇴부에서 균형관절까지는 215.0 mm, 도립 진자의 길이는 380.0mm이다. 또한 발바닥의 크기는 보행 진행방향으로 170.0mm, 좌우 방향으로 90.0mm이다. 발바닥 링크의 질량은 2.11Kg이며, 하박은 3.77Kg, 상박은 6.23Kg이고 대퇴부는 5.14Kg이다. 또한 도립 진자의 회전 링크의 질량은 4.6Kg이고 도립 진자 질량은 17.5Kg이며, 전체 질량은 51.5Kg 이다.

III. 보행 안정성 모델링

이족 보행 로봇의 걸음새 분석과 안정도 해석을 위한 동역학적 가정은 첫째, 각 링크의 하중은 링크의 무게중심에 집중되어 있으며 해석상 9개의 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'Alembert 원리에 의한 모멘트 운동 방정식을 정리하여 (1)과 (2)와 같은 균형점 검증 방정식을 유도한다[14].

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

$$y_{zmp} = \frac{\sum_{i=0}^8 (M_i(\ddot{z}_i + G_z)y_i - M_i(\ddot{y}_i + G_y)z_i)}{\sum_{i=0}^8 M_i(\ddot{z}_i + G_z)} \quad (2)$$

여기서 기준 좌표계는 월드 좌표계이며  $x_{zmp}$ 와  $y_{zmp}$ 는 각

각 XY 평면에 위치한 균형점의 위치성분을 나타내며  $i$ 는 각 질점의 인덱스를 나타낸다.  $M_i$ 은 각 질점의 질량을 나타내고  $G_x, G_y, G_z$ 는 각각 각 좌표계에 작용하는 중력 가속도를 의미한다.  $x_i, y_i, z_i$ 는 각 질점의 직교 좌표계에서의 위치 성분을 나타내고  $\ddot{x}_i, \ddot{y}_i, \ddot{z}_i$ 는 선가속도 성분을 나타낸다.

(1)과 (2)을 2개의 자유도를 가지는 하나의 집중질량 균형추  $M_0$ 에 관해 정리하여 (3)과 (4)와 같은 2개의 2차 비선형 미분방정식의 균형추 운동방정식이 유도된다. 여기서  $x_0, y_0, z_0$ 는 균형추의 직교 좌표계에서의 위치 성분을 나타내고  $\ddot{x}_0, \ddot{y}_0, \ddot{z}_0$ 는 선가속도 성분을 나타낸다. 그리고  $\alpha(t)$ 와  $\beta(t)$ 는 (5)와 (6)과 같이 정의되며,  $x_{zmp}^*, y_{zmp}^*$ 는 각각 목표 균형점의 XY성분을 나타낸다. 또한  $\gamma(t)$ 는 (7)과 같다.

$$\ddot{x}_0(t) - \gamma(t)x_0(t) = \alpha(t) \quad (3)$$

$$\ddot{y}_0(t) - \gamma(t)y_0(t) = \beta(t) \quad (4)$$

$$\alpha(t) = \frac{\sum_{i=1}^8 M_i(\ddot{z}_i + G_z)(x_i - x_{zmp}^*) - M_i\ddot{x}_i z_i}{M_0 z_0} \frac{(\ddot{z}_0 + G_z)x_{zmp}^*}{z_0} \quad (5)$$

$$\beta(t) = \frac{\sum_{i=1}^8 M_i(\ddot{z}_i + G_z)(y_i - y_{zmp}^*) - M_i\ddot{y}_i z_i}{M_0 z_0} \frac{(\ddot{z}_0 + G_z)y_{zmp}^*}{z_0} \quad (6)$$

$$\gamma(t) = \frac{(\ddot{z}_0 + G_z)}{z_0} \quad (7)$$

(7)에서 나타난 바와 같이 기존 원통형 균형추의 균형 운동방정식은 균형추의 Z 방향운동이 고정 시에는  $\gamma(t)$ 가 상수항으로서 선형 미분방정식을 가지는 반면에, 제한된 원구형 균형추의 균형 운동방정식은 균형추의 Z 방향운동이 항상 발생하기 때문에 비선형의 운동 특성을 가진다[15]. 이에 본 논문에서는  $\gamma(t)$ 의  $\dot{z}_0$ 을 상수항으로서 선형화 시킨 후 수치해석적 방법인 BVP(Boundary Value Problem)을 이용한 유한차분법으로 균형추의 운동을 유도한 방법과 유전 알고리즘을 이용하여 특정한 목적함수를 최적화하는 균형추의 운동을 서로 비교 및 분석하여 인간과 같이 안정되고 부드러운 보행을 구현하고자 한다.

IV. 유전 알고리즘

유전 알고리즘은 적자생존의 이론의 진화 현상에 기반한 병렬적이고 전역적인 탐색 알고리즘으로서 해석적인 접근이 아닌 대수적인 접근으로 최적 해를 구할 수 있는 알고리즘이다. 유전 알고리즘은 생물학적 유전자인 염색체에 해당하는 문자열로 표현된 자료를 생물과 유사한 재생산, 교배, 돌연변이 과정을 거쳐 좀더 진화된 다음 세대의 새로운 자손을 인공적으로 만들어내는 방법이다. 여기서 균형추의 비선형 운동 방정식을 유전 알고리즘을 이용하여 기존의 선형화에 따른 오차와 보행 안정성을 비교한다.

이족 보행로봇의 도립 진자 균형추의 운동을 결정하기 위한 조건으로 각 단위보행에서의 보행거리와 시간은 각각

표 1. 유전 알고리즘의 매개변수.

Table 1. Parameters of genetic algorithm.

Parameter	Value
Population	50
Generation	50
Crossover Rate	0.9
Mutation Rate	0.3
Fitness Function	$f_1 = \sum \left\{ \frac{ \Delta\theta_{ROLL}  +  \Delta\theta_{PITCH} }{\Delta t} \right\}$

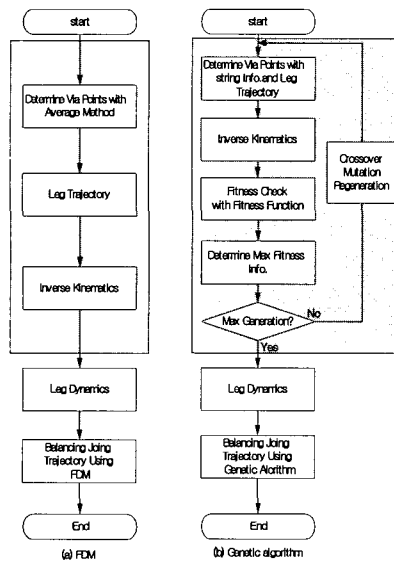


그림 3. 유한차분법과 유전 알고리즘의 순서도.  
Fig. 3. Flowcharts of FDM and GA.

280mm와 3.5초 설정하고 균형추의 시작위치와 종료 위치 그리고 중간 경유점의 위치, 속도, 가속도 등을 유전자 데이터로 설정하였다. 그리고 이에 따른 유전 알고리즘을 이용하기 위한 제한조건은 아래와 같다.

표 1에서  $\Delta\theta_{ROLL}$  과  $\Delta\theta_{PITCH}$  는 원구형 균형추의 균형관절의 이동거리를 나타내며  $\Delta t$  는 단위시간을 의미한다. 따라서 유전 알고리즘의 목적함수는 균형관절의 총 이동량을 최소화 할 수 있는 경유점 정보를 결정함으로써 균형추의 운동을 부드러운 최적의 운동으로 결정할 수 있다. 유전 알고리즘은 PC Windows 기반의MATLAB을 이용하여 작성하였고, 교배율을 0.9로 돌연변이 비율을 0.3으로 하였을 때 가장 최적의 값이 가장 잘 일어남을 알 수 있었다. 또한 한 세대 연산량을 50세대로 한정하였다.

기존 유한차분법에 의한 균형추의 운동 궤적 계산 방법과 유전 알고리즘을 이용한 방법을 비교한 순서도는 그림 3과 같다. 기존 유한차분법에 의한 방법은 비선형의 미분 방정식을 선형화 하여, 다리부와 몸체의 5차 spline 궤적 생성을 위한 4쌍의 위치, 속도, 가속도의 경유점 정보와 목표 균형점의 경유점 정보를 입력 받아 균형추의 동작을 계산하고 이를 균형 검증 방정식을 통해 안정한 보행인지를 판별한다. 이는 해석적 방법에 의한 수식의 계산만을 요구하여 상대적으로

빠른 해를 구할 수 있으나 선형화 과정에 의해 생략되고 무시된 운동의 영향으로 목표 균형점의 추종성이 기존 원통형 균형추보다 다소 떨어진다. 그러나 이족 보행로봇의 구조가 점점 인간과 유사한 형태를 가지므로 균형추의 형태도 독립진자의 원구형 형태로 요구된다. 유전 알고리즘은 목표 균형점을 제외한 유한차분법과 동일한 다리부와 몸체의 경유점 정보를 기반으로 균형추의 경유점 정보를 유전자로서 균형관절의 운동을 최소화 하는 목적함수를 이용한다. 또한 각 유전자 정보에 의한 균형추의 운동 궤적은 균형 검증 방정식에 의해 안정성을 검증 한 후 유전된다.

V. 모의 실험

이족 보행로봇의 균형추 운동을 모의실험 하기 위한 다리관절의 위치궤적은 그림4와 같다. 단위보행의 다리궤적은 3.5초를 기준으로 4개의 경유점을 가지는 5차 spline을 사용하여 총 6보의 21초 궤적이다. 각 경유점의 위치, 속도 그리고 가속도의 시작 값과 종료 값의 6개 조건을 이용하여 5차 spline을 생성하고 이를 각 단위보행 마다 3개씩 생성하였다.

유한차분법에 의한 균형추의 궤적은 그림 5와 같다. 각 단위보행에 따라 그림 5의 (a)는 초기 시작보행이며, (b)와 (c)는 중간 반복 보행이고 (d)는 종료 보행을 나타낸다. 그림 5와 그림 6의 가로축은 보행의 좌우 방향을 나타내며 세로축은 보행의 진행 방향을 나타내고 기준 좌표계는 균형추의 로컬 좌표계이다. 추가보행 시 보행 초기자세로 초기화가 요구된다.

그림 6은 유전 알고리즘을 이용한 균형추의 궤적을 나타낸다. 그림 6의 (a)에 나타난 바와 같이 기존 유한차분법에 의한 균형추의 궤적과 다른 형태의 움직임을 볼 수 있다. 유전 알고리즘에 의한 균형추의 궤적은 동작 변경이 다소 증가하는 형태를 나타냄에도 불구하고 기존 방법보다 부드러운

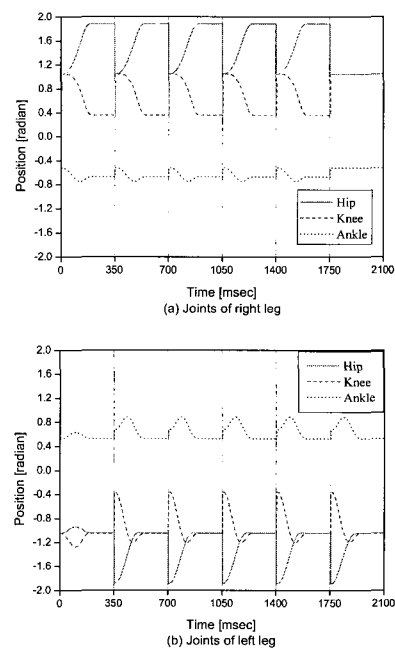


그림 4. 각 관절의 위치 궤적.  
Fig. 4. Trajectories of each joint position.

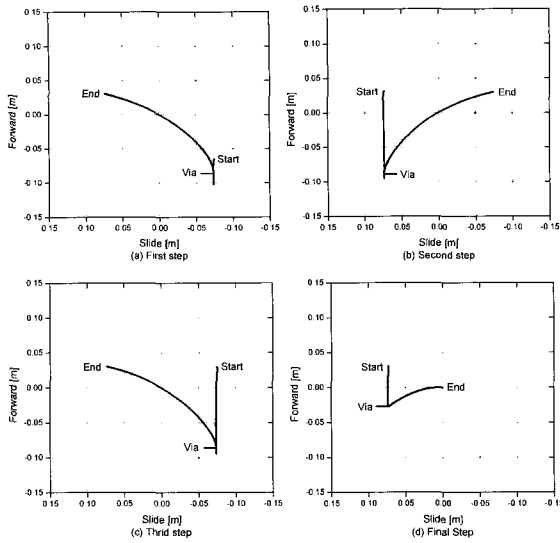


그림 5. 유한차분법에 의한 균형추의 궤적.  
Fig. 5. Trajectories of balancing weight by using FDM.

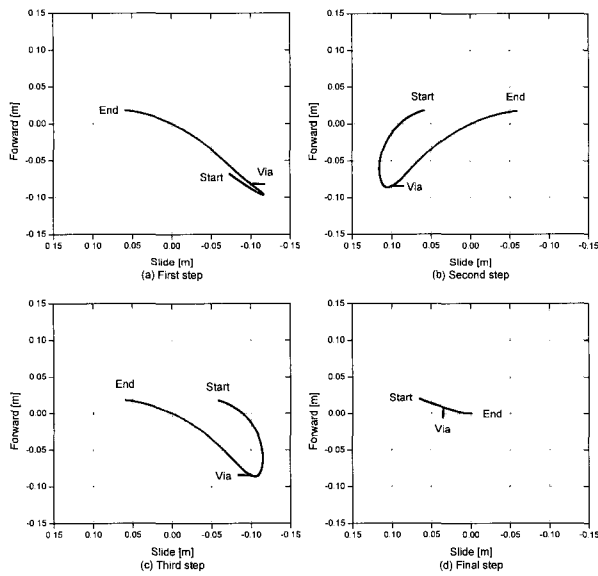


그림 6. 유전 알고리즘에 의한 균형추의 궤적.  
Fig. 6. Trajectories of balancing weight by using GA.

동작을 구현할 수 있다.

이에 유한차분법에 의한 목표 균형점과 실제 균형점의 궤적과 유전 알고리즘을 이용한 실제 균형점 궤적을 나타내면 그림 7과 같다. 그림 7의 가로축은 보행방향의 좌우를 나타내며 세로축은 보행진행 방향을 나타낸다. 또한 사각형은 발바닥의 위치를 나타낸다. 이는 한다리 지지상태에서의 안정 영역을 나타내며, 양다리 지지상태에서는 두 다리의 외각 다각형이 안정영역을 나타낸다. 그림 7의 (a)는 기존 유한차분법에 의한 목표 균형점과 실제 균형점의 궤적을 나타내고 (b)는 유전 알고리즘을 이용한 실제 균형점의 궤적을 나타낸다. 유전 알고리즘에 의해 지지다리의 변화 시 실제 균형점의 변화가 기존의 방법보다 감소하는 현상을 그림 7에 의해 예측할 수 있다.

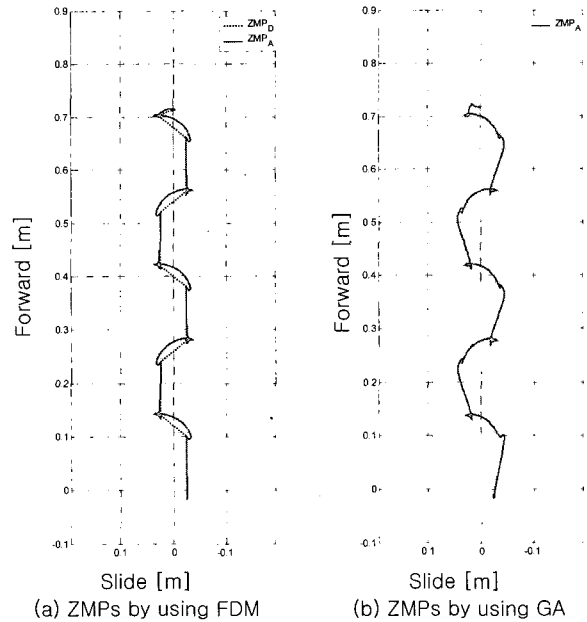


그림 7. 유한차분법과 유전 알고리즘에 의한 균형점 궤적 비교.  
Fig. 7. Comparison of ZMP Trajectories by using FDM and by using GA.

VI. 실험 및 결과

그림 8은 실제 이족 보행로봇 IWR-IV를 실험하기 위한 시스템의 전체 구조를 나타낸다.

모의실험에 의해 검증된 총 6보 21초 동안의 균형추의 궤적과 다리부의 궤적을 실제 이족 보행로봇 IWR-IV로 실험한 연속 사진은 그림 9와 같다. 보행 중 양다리 지지상태로 변화 시 발바닥과 지면과의 충격으로 약간 불안정한 보행을 수행하였다. 모의실험에 예상한 바와 같이 양다리 지지상태로 변화 시 유한 차분법을 사용한 BVP에 의한 균형추 궤적의 해가 급격한 변화가 원인으로 실험을 통해 검증 할 수 있었다.

그림 10은 유한 차분법에 의한 실험결과, 이족 보행로봇의 보행 중 제어를 통해 계측된 각 관절의 궤적 추종 오차를 나타낸다. 그림 10의 (a) ~ (f)는 다리 관절의 오차를 나타내며 특히 양다리 지지상태로 변화되는 3.5초 단위보행 중 매 2.0 초 전후 시점에서 오차가 증가됨을 알수있다.

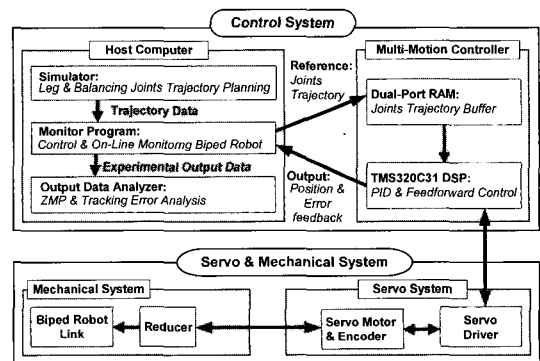


그림 8. 이족 보행로봇의 시스템 구성.  
Fig. 8. The system of a biped robot.

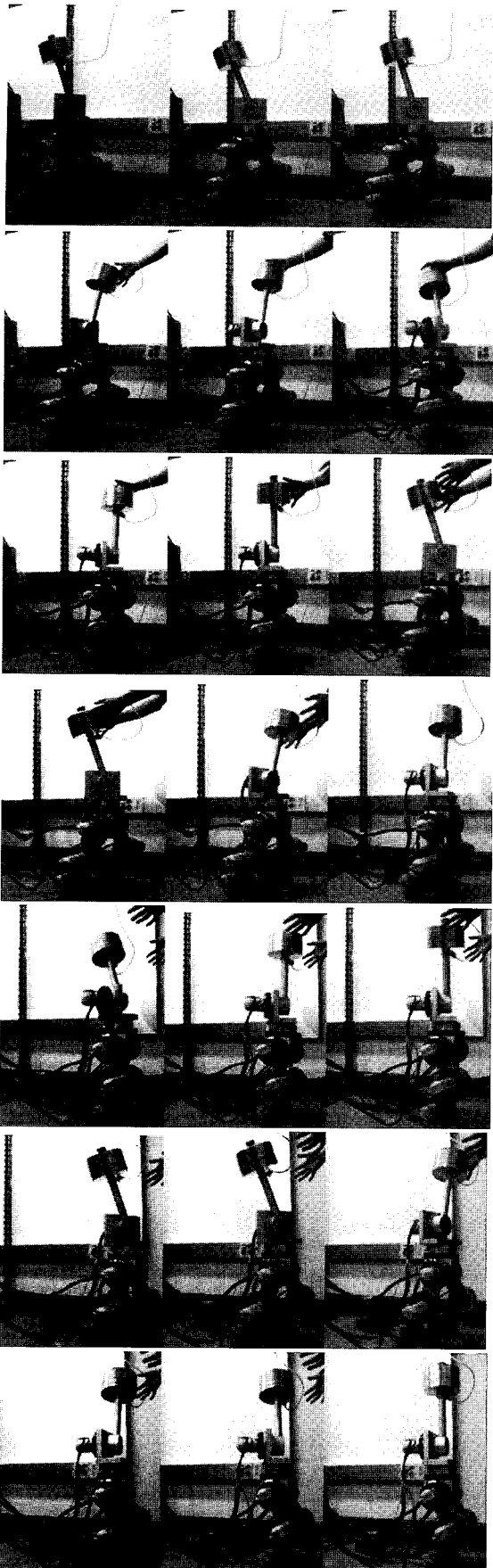


그림 9. 유한 차분법에 의한 보행 실험.  
Fig. 9. Pictures of walking by using FDM.

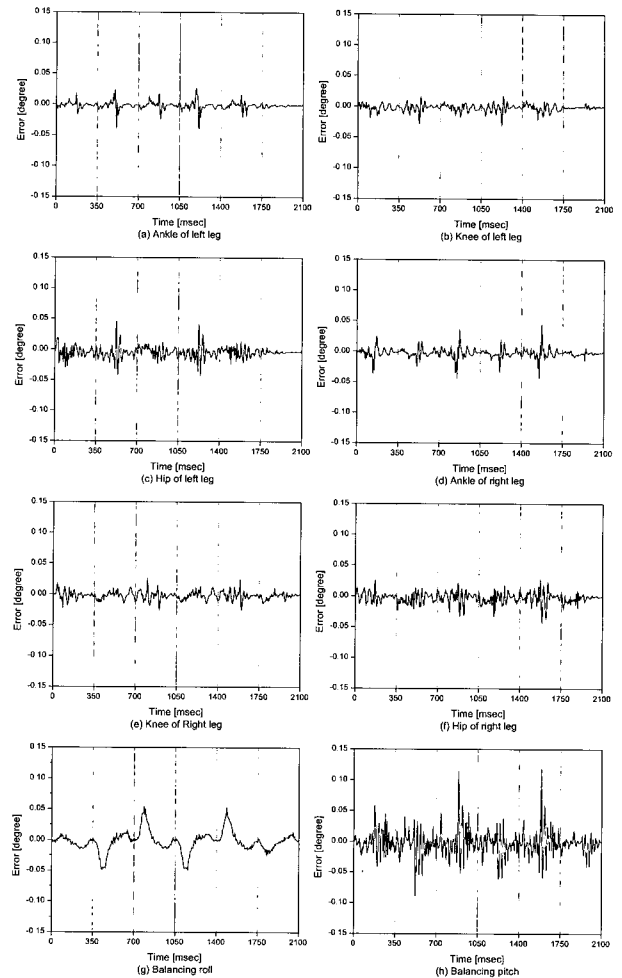


그림 10. 유한 차분법에 의한 위치 추종 오차.  
Fig. 10. Position errors of each joint by using FDM.

또한 발목관절과 무릎관절에 비해 대퇴부 관절의 오차가 다소 증가되고 오차의 주파수 특성도 나빠짐을 볼 수 있다. 그리고 그림 10의 (g)는 도립 진자 균형추의 Roll관절 오차를 나타내고 (f)는 Pitch 관절의 오차를 나타내는데, Roll관절의 오차는 한다리 지지상태가 양다리 지지상태보다 증가되고, Pitch 관절은 전반적으로 고주파의 오차 특성을 가진다.

유전 알고리즘에 의해 생성된 균형추의 궤적과 다리부의 궤적을 이족 보행로봇 IWR-IV로 실험한 결과는 그림 11에 나타난 바와 같다. 유한차분법에 나타난 양다리 지지상태로 변화 시 불안정한 보행이 제거된 형상을 실험을 통해 검증할 수 있었다. 그림 11은 총 21초간 매 1초마다의 보행상태를 시간 순으로 나타내고있다. 이러한 안정된 보행결과는 그림 12의 제어기를 통해 계측된 각 관절의 궤적 추종 오차를 통해 유한 차분법에 의한 보행 결과와 비교할 수 있다. 그림 12의 (a) ~ (f)는 다리 관절의 오차를 나타내는데 기존의 유한 차분법에 의한 결과와 달리 지지다리의 변화에 따른 영향을 다소 적게 받음을 알수있다.

다만 대퇴부 관절의 궤적 추종 오차가 고주파의 특성이 다소 증가 됨을 실험결과 알수있다. 또한 그림 12의 (g)는 도립 진자 균형추의 Roll 관절의 오차를 나타내는데, 오차의 절대 크기는 감소하나 다리부 동작의 영향을 받음을 나타낸다. 그

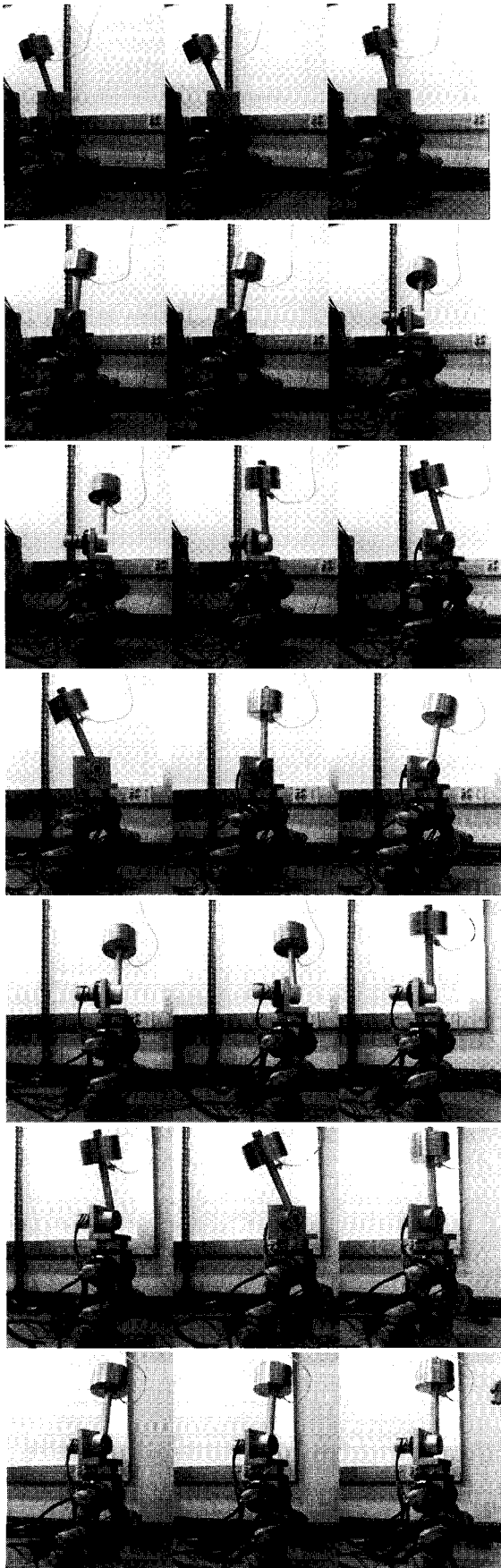


그림 11. 유전 알고리즘에 의한 보행 실험.  
Fig. 11. Pictures of walking by using FDM.

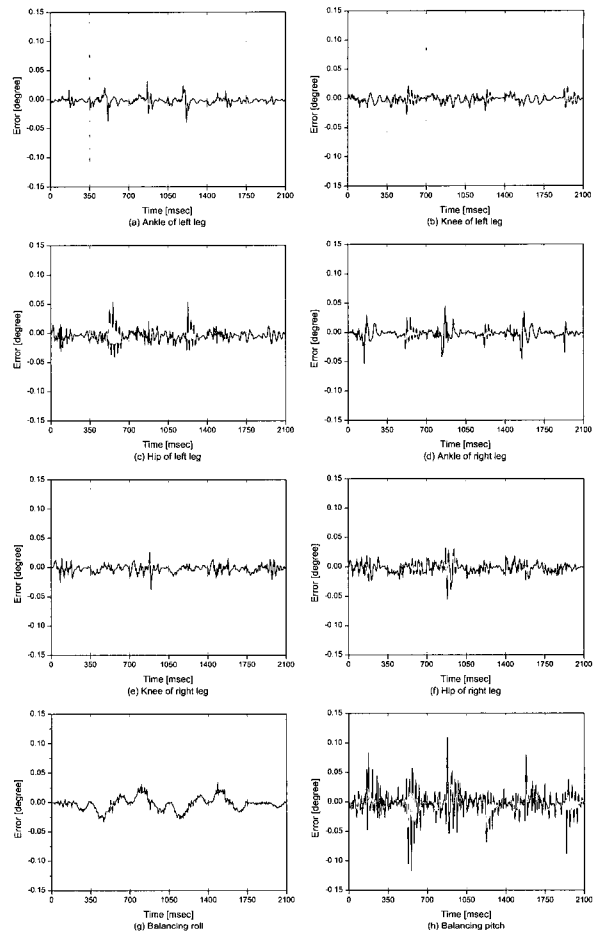


그림 12. 유전 알고리즘에 의한 위치 추종 오차.  
Fig. 12. Position errors of each joint by using GA.

러한 유전 알고리즘을 이용한 도립 진자 균형추의 보행특성은 기존 유한 차분법에 의한 보행에 비해 좀더 유연하고 인간과 같이 부드러운 형태를 가질 수 있음을 실험을 통해 검증할 수 있었다.

**VII. 결론 및 고찰**

도립 진자 형태의 균형추를 가지는 이족 보행로봇의 안정된 보행을 유한 차분법과 유전 알고리즘을 통해 모의실험과 실제 이족 보행로봇의 실험을 통해 검증하였다. 원구형 균형관절에 의해 이족 보행로봇의 균형 방정식은 비선형 미분 방정식임을 유도하고 이를 선형화 하여 유한 차분법에 의해 균형추의 동작을 구현하였다. 또한 유전 알고리즘을 이용하여 균형 방정식의 비선형성을 포함한 좀더 유연하고 인간과 유사한 균형추의 동작 궤적을 획득할 수 있었으며 이를 실험을 통해 적용하였다. 따라서 도립 진자 형태의 균형추가 가지는 이족 보행로봇의 비선형적인 특성을 실제 보행 실험을 통해 안정적인 보행을 검증할 수 있었다.

향후 다양한 보행조건 하에서 기존의 유한차분법과 유전 알고리즘을 서로 비교하여 인간형 로봇의 다양하고 유연한 보행을 위한 유전 알고리즘을 확장 및 적용하고 비전을 이용하여 로봇이 주위환경에 대해 인지하는 시스템의 구축과 더불어 이에 순응하여 장애물을 회피할 수 있는 보행을 할 수 있는 로

봇과 이를 운용하기 위한 프로그램 및 알고리즘의 개발이 요구된다. 또한 로봇의 보행 안정성을 수치적으로 검증하기 위해서는 발바닥에 FSR 센서와 같은 외부 센서를 부착하여 이를 기준으로 안정성을 비교하는 향후 연구가 필요하다.

#### 참고문헌

- [1] M. Vukobratovic, J. Stepanenko, "Mathematical models of general anthropomorphic systems," *Mathematical Biosciences* 17, pp. 191-242, 1973.
- [2] M. Vukobratovic, J. Stepanenko, "Legged locomotion robot," Nikkan Kogyo Shinbunsha, 1975.
- [3] A. Takanishi, M. Ishida, Y. Yamazaki, 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.
- [4] C. L. Shin, Y. Z. Li, S. Chung, T. T. Lee, W. A. Gruven, "Trajectory synthesis and physical admissibility for a biped robot during the single support phase," *IEEE*, pp. 1646-1650, 1990.
- [5] K. J. Waldron, "Realization of dynamic biped walking stabilized with truck motion under known external force," *advanced robotics*, pp. 299-310, 1989.
- [6] A. Takanishi, Y. Egusa, M. Tochizawa, M. Takeya, 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.
- [7] J. Yamaguchi et al., "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.
- [8] J. Yamaguchi et al., "Development of a biped walking robot adapting to horizontally uneven surface," *IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and System*, pp. 1156-1163, 1994.
- [9] S. Kagami, F. Kanehiro, Y. Tamiya, M. Inaba, 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.
- [10] K. D. Mombaur, H. G. Bock, J. P. Schloder, "Human-like actuated walking that is asymptotically stable without feedback," *Proc. of the 2001 IEEE Intl. Conf. on Robotics & Automation*, pp. 4128-4133, 2001.
- [11] K. Nagasaka, M. Inaba, and H. Inoue, "Stabilization of dynamic walk on a humanoid using torso position compliance control," *Proc. of 17th Annual Conference on Robotics Society of Japan*, pp. 1193-1194, 1999.
- [12] S. H. Lim, J. G. Kim, "Biped locomotion with mechanical compliance," *Korea Robotics and Automation Workshop Conference*, pp. 21-25, 1992.
- [13] S. H. Lim, J. G. Kim, "Development of adaptive gait algorithm for IWR Biped Robot," *KACC*, pp. 113-118, 1993.
- [14] M. Vukobratovic, A. A. Frank and D. Juricic, "On the stability of biped locomotion," *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, BME-17 (1), pp. 25-36, 1970.
- [15] H. O. Lim and A. Takanishi, "Biped humanoid robots in human environments adaptability and emotion," *Proceedings of the International Conference on Adaptive Motion of Animals and Machines*, 2000.

#### 노경곤

1997년 인하대 자동화공학과 졸업. 2000년 동대학원 석사졸업. 2000년~현재 동대학원 박사과정 재학중. 관심분야는 로봇 제어 및 모의실험.



#### 강찬수

1999년 단국대 산업공학과 졸업. 2004년 인하대 대학원 석사졸업. 관심분야는 로봇 제어 및 모의실험.



#### 김진걸

1978년 서울대 전기공학과 졸업. 1988년 Univ. of Iowa 전기 및 컴퓨터 공학과 박사 졸업. 1988년~현재 인하대 전자·전기공학부 교수. 관심분야는 로봇 제어 및 비선형 제어.

