

# 휴머노이드 로봇의 자세 제어에 관한 연구

## A Study on the Posture Control of a Humanoid Robot

공정식\*, 김진걸, 이보희  
(Jung-Shik Kong, Jin-Geol Kim, and Bo-Hee Lee)

**Abstract :** This paper deals with determination of motions of a humanoid robot using genetic algorithm. A humanoid robot has some problems of the structural instability basically. So, we have to consider the stable walking gait in gait planning. Besides, it is important to make the smoothly optimal gait for saving the electric power. A mobile robot has a battery to move autonomously. But a humanoid robot needs more electric power in order to drive many joints. So, if movements of walking joints don't maintain optimally, it is difficult for a robot to have working time for a long time. Also, if a gait trajectory doesn't have optimal state, the expected life span of joints tends to be decreased. To solve these problems, the genetic algorithm is employed to guarantee the optimal gait trajectory. The fitness functions in a genetic algorithm are introduced to find out optimal trajectory, which enables the robot to have the less reduced jerk of joints and get smooth movement. With these all process accomplished by a PC-based program, the optimal solution could be obtained from the simulation. In addition, we discuss the design consideration for the joint motion and distributed computation of the humanoid, ISHURO, and suggest its result such as the structure of the network and a disturbance observer.

**Keywords :** humanoid robot, genetic algorithm, optimal walking, gait generation

### I. 서론

최근 국내외적으로 이동 로봇에 대한 관심이 증대되고 또 이러한 관심은 로봇 분야의 기술 발전과 새로운 로봇의 개발로 이루어지고 있다. 특히 인간 형상을 가지고 있는 휴머노이드 로봇에 대한 연구 및 개발 속도는 과히 혁신적이라 할 수 있다. 이러한 휴머노이드 로봇의 대표적인 예로 혼다사의 ASIMO[1], 소니사의 SDR-4X[2], 후지쯔사의 HOAP[3, 4] 등이 있다. 기본적으로 휴머노이드 로봇은 기구학적으로 불안정성을 내포하고 있으므로, 안정성을 확보하면서 보행하고자 하는 연구가 지속적으로 진행되어 오고 있다. 이러한 보행상의 안정성을 위한 연구로써는, 로봇의 안정성 지표 중 하나인 ZMP(Zero Moment Point)를 직접적으로 보행에 적용한 경우[5, 6]와 인간 보행 형상을 이용하여 제작된 로봇에 이용한 경우로 나눌 수 있다[7]. 전자의 경우 보행의 안정성을 직접적으로 검증하면서 보행할 수 있는 장점을 가지고 있으나 자연스러운 보행을 수행하기는 어렵다. 그리고 후자의 경우 인간 형상의 보행을 유추하기 때문에 기본적인 안정성 확보가 능동적으로 이루어지지 못하며 나아가 자율 보행 시 이에 대해 능동적으로 대처하기 어려운 문제점을 내포하고 있다.

본 논문에서는 보행 궤적 생성 시 고려되는 두 가지의 경우에 대해 두 가지 모듈을 능동적으로 대처할 수 있는 알고리즘을 제안하고자 한다. 이러한 두 가지 경우를 능동적으로 만족시키기 위해서 먼저 보행 생성 시, 다리부의 궤적을 유전 알고리즘을 이용하여 부드러운 궤적을 생성한다. 이때 ZMP 검증 과정을 수행함으로써 부드러운 궤적을 생성함과

동시에 그에 대한 안정성을 확보할 수 있도록 한다. 또 유전 알고리즘 적용 시 적합도 함수를 다양하게 접근하여 가장 최적의 적합도 상황을 고려하였다. 제안된 방법은 시뮬레이션으로 검증하였다.

### II. ISHURO 시스템 구조

본 알고리즘을 구현하기 위한 시스템은 현재 개발중인 휴머노이드 로봇인 ISHURO이다. 이 로봇은 전장 75cm, 무게 6.5kg의 로봇이며, 전체 22 자유도를 지닌 로봇이다. 그림 1은 ISHURO의 3D모델과 좌표계 시스템을 나타낸다.

ISHURO의 시스템은 기본적으로 모듈화 형태를 기본으로 한다. 이는 각 관절에 제어 모듈을 내장하고 있음을 의미하며 각각의 모듈은 CAN통신을 통해 제어 신호를 주고 받으며 이러한 각각의 모듈은 상부 주 제어기에서 각 모듈에 대한 정보를 처리한다. 그림 2는 ISHURO의 제어 시스템을 나타낸다. ISHURO 시스템은 크게 3부분으로 나뉘어진다. 상부 제어기와 주 제어기 그리고 하부 제어기로 나뉘는데, 먼저 상부 제어기는 로봇에 대한 사용자의 명령을 처리하고 이에 대한 결과를 로봇 시스템에 전달하는 역할을 한다. 이러한 상부 제어기는 PC를 통해 구현하였으며 상부 제어기와 주 제어기 사이에는 811.02b 무선 네트워크를 기본으로 한다. 그리고 하부 제어기는 모터의 정밀제어, 주 제어기와 통신 센서 인식 등을 수행한다.

하부 제어기는 TI사의 32비트 연산 DSP인 TMS320F2812-150MHz를 이용하여 구현하였다. 이 CPU는 기본적으로 내부에 CAN(Controller Area Network)통신 모듈을 가지고 있으며 A/D 컨버터를 내장하고 있어 FSR(force Sensing Resister) 센서의 정보를 가지고 올 수 있다. 그리고 PWM생성 모듈과 엔코더 인식 모듈을 가지고 있어 모터 제어에 적합하다. 주 제어기의 경우 Intel사의 32비트 마이크로인텔 XSCALE-400MHz를 사용하고 있으며 기본적으로 임베디드 리눅스가 포팅되어 있다.

\* 책임저자(Corresponding Author)

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

공정식 : 인하대학교 자동화공학과(tempus@dreamwiz.com)

김진걸 : 인하대학교 전자전기공학부(john@inha.ac.kr)

이보희 : 세명대학교 전기공학과(bhlee@semyung.ac.kr)

※ 이 논문은 2004년도 인하대학교 지원에 의하여 연구되었습니다 (2004-31646).

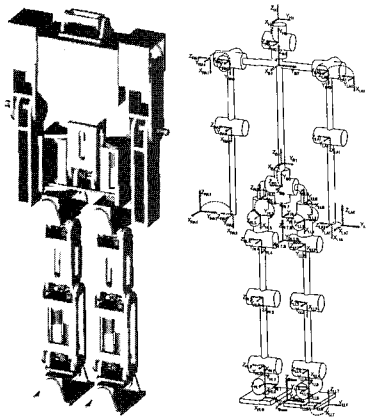


그림 1. ISHURO의 3D모델 및 좌표계 시스템.  
Fig. 1. 3D model and coordinate system of ISHURO.

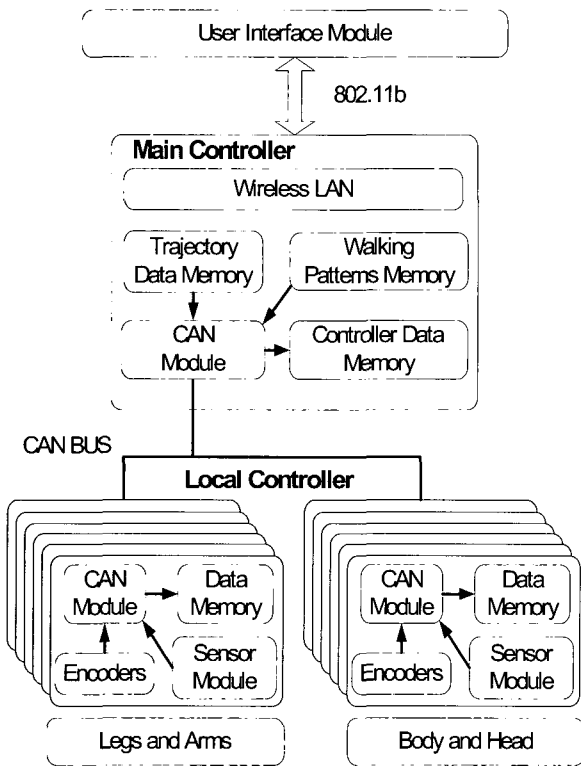


그림 2. 시스템 구조.  
Fig. 2. System configuration.

주 제어기는 기본적으로 하부 제어기에 필요한 모터 구동 정보를 제공하고 이에 따른 각 관절 변수의 정보를 CAN통신을 통해 주고 받는다. 이때 주 제어기와 하부제어기를 연결 시는 상부제어기에는 CAN 제어모듈이 없기 때문에 Infention사의 81C90칩을 추가하여 구현하였다.

ISHURO시스템의 경우 구동 모터에 대한 데이터 22개와 이에 대한 현재 출력 값 22개의 데이터를 실시간으로 전송해야 한다. 따라서 CAN통신상에서 통신속도 500kbp로 하고 40ms정도의 주기를 가지고 제어를 수행하여 안정성을 확보

하였다. 구동부는 MAXON사의 DC모터를 기본으로 하고 있으며 기구부가 기본적으로 가지고 있는 비선형적 요소를 제거하기 위해 외란 관측기를 사용하여 리밋사이클(limit cycle)을 제거할 수 있었다[8-10].

센서 시스템은 발바닥에 장착되어 있는 FSR센서의 정보를 통해 ZMP(Zero Moment Point)를 구하는데 사용된다. ZMP는 로봇의 안정보행에 있어서 안정화 정도의 지표가 되는 정보로써 시스템에 걸려있는 각 관절의 움직임과 외력에 의해 유도된다. (1)과 (2)는 ISHURO에 대한 ZMP식을 나타낸다.

$$x_{ZMP} = \frac{\sum_{i=0}^{15} (M_i(\ddot{z}_i + G_z)x_i - M_i\ddot{x}_iz_i)}{\sum_{i=0}^{15} M_i(\ddot{z}_i + G_z)} \quad (1)$$

$$y_{ZMP} = \frac{\sum_{i=0}^{15} (M_i(\ddot{z}_i + G_z)y_i - M_i\ddot{y}_iz_i)}{\sum_{i=0}^{15} M_i(\ddot{z}_i + G_z)} \quad (2)$$

(1)과 (2)에서  $x_{ZMP}$  와  $y_{ZMP}$  는 지지각 기준좌표에 대한 균형점 좌표를 나타내고  $M_i$  는  $i$ 번째 질점의 질량을 나타내며,  $x_i, y_i, z_i$  는 각 질점 에서의 선가속도 성분을 나타낸다. 또한  $G = (G_x, G_y, G_z)$  는 중력 가속도 벡터를 의미한다. 본 논문에서는 기준좌표계를 보행 시 지지각의 좌표계를 기준좌표계로 하여 해석하였다. 이에 ZMP위치와 중력가속도 정보는 이 좌표계를 좌표계를 기준으로 하여 생성된다. (1)과 (2)는 D'Alembert 에 의해 유도되었으며 현재 로봇 시스템은 질량모델을 총 15개로 분리하여 해석을 수행하였다. 그리고 로봇 시스템에서 ZMP를 측정하여 그에 따른 시뮬레이션 데이터와 실제 데이터를 비교하기 위해서 FSR센서를 이용하였다. FSR센서를 센서에 작용하는 힘을 전압의 변화로 바꾸어 주는 센서로써 FSR센서를 이용하여 지면에 작용하는 반발력을 계산할 수 있으며 센서의 위치가 발바닥상에 이미 정해진 위치에 장착되어 있기 때문에 거리정보를 알 수 있으며 이를 이용하여 모멘트도 측정할 수 있으며 더 나아가 로봇의 안정점인 ZMP를 측정할 수 있다[11,12]. (3)과 (4)는 지면에 반발력에 따른 ZMP 위치를 나타낸다. (3)과 (4)의  $\tilde{x}_{ZMP}, \tilde{y}_{ZMP}$  은 각각 발바닥 기준 좌표계에 대한 센서로 측정된 균형점을 나타내며,  $f_i$  는 FSR센서에 의한 로봇의 지면 반발력을 나타낸다. 그리고  $\tilde{x}_i$  와  $\tilde{y}_i$  는 발바닥에 설치된 FSR센서의 발바닥 기준 좌표계에 대한 상대 위치를 나타낸다. (1)과 (2)가 로봇의 움직임에 따른 ZMP라고 하면 (3)과 (4)는 실제 발바닥에 작용하는 힘에 의한 측정된 ZMP값이라고 할 수 있다. ISHURO에는 양다리에 각각 5개씩의 FSR센서를 장착하여 ZMP를 측정 하였다.

$$\bar{x}_{ZMP} = \frac{\sum_{i=1}^n f_i \times \bar{x}_i}{\sum_{i=1}^n f_i} \quad (3)$$

$$\bar{y}_{ZMP} = \frac{\sum_{i=1}^n f_i \times \bar{y}_i}{\sum_{i=1}^n f_i} \quad (4)$$

**III. 보행 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 가능한 해들을 정해진 형태의 자료 구조로 표현한 다음 이들을 재생산, 교배, 돌연변이를 거치면서 점차적으로 더 좋은 해들을 만들어낸다[13,14]. 유전 알고리즘은 미분 방정식적인 접근이 아닌 대수적인 접근으로 해를 유추해 낼 수 있으므로 해석이 난해하고 계산이 복잡한 시스템에 적용하기 유리하다.

휴머노이드 로봇이 보행함에 있어서 가장 고려해야 할 부분은 얼마나 안정적으로 보행을 수행하느냐는 것과 로봇이 얼마나 에너지 소비를 줄일 수 있는 움직임을 만들어내느냐 하는 것이다. 이러한 두 가지 요소를 충족시키기 위해서는 안정적이면서 자연스러운 다리 궤적 생성이 가장 중요한 부분이다. 본 논문에서는 이러한 자연스러우면서도 안정적인 보행을 수행하기 위해 유전 알고리즘을 사용하여 지지각과 유각의 끝 단의 움직임에 대해 5차 다항식 곡선을 이용하여 움직임을 정의하였다. ISHURO에서 몸체의 움직임은 발바닥이 고정되어 있는 지지각의 끝 단의 움직임과 일치하므로 몸체의 움직임을 지지각의 움직임으로 해석하였고 지지각의 움직임에 대해 유각이 지면과 충돌하지 않으면서 움직일 수 있도록 유각의 발바닥 끝 단의 움직임 또한 5차 다항식 곡선으로 표현하였다. 그리고 이러한 지지각과 유각의 움직임을 합성함으로써 로봇의 움직임을 결정할 수 있다. 그리고 이때 로봇의 움직임에 대한 안정성 검증은 ZMP를 이용하여 ZMP 점이 한 다리 지지상태일 때 지지각 내에 ZMP가 존재할 경우 안정성이 확보되므로 ZMP의 위치를 확인하여 안정성을 검증하였다. (5)는 기본적인 궤적 생성 다항식 곡선이다.

$$y(t) = \alpha_0 + \alpha_1 t + \alpha_2 t^2 + \alpha_3 t^3 + \alpha_4 t^4 + \alpha_5 t^5 \quad (5)$$

(6)-(9)는 (5)의 경유점 정보를 이용하여 구한  $\alpha_i, i=0, 5$ 에 대한 각각의 결과값을 나타낸다.

$$\alpha_0 = p_i, \alpha_1 = v_i, \alpha_2 = \frac{a_i}{2} \quad (6)$$

$$\alpha_3 = \frac{20p_f - 20p_i - (8v_f + 12v_i)\Delta t_f - (3a_i - a_f)\Delta t^2}{2\Delta t^3} \quad (7)$$

$$\alpha_4 = \frac{30p_i - 30p_f + (16v_i + 14v_f)\Delta t + (3a_i - a_f)\Delta t^2}{2\Delta t^4} \quad (8)$$

$$\alpha_5 = \frac{12p_i - 12p_f - (16v_i + 14v_f)\Delta t + (a_i - a_f)\Delta t^2}{2\Delta t^5} \quad (9)$$

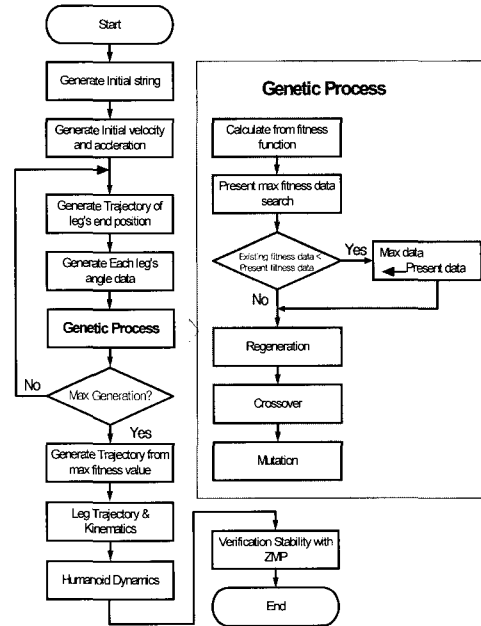


그림 3. 유전알고리즘 흐름도.

Fig. 3. Flowchart of genetic algorithm.

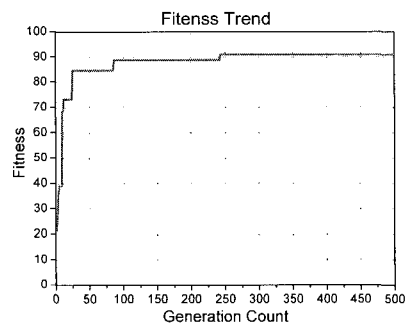


그림 4. 세대 수에 따른 적합도 추이.

Fig. 4. Fitness trend according to number of generation.

표 1. 유전알고리즘의 구성요소.

Table 1. Parameters of genetic algorithm.

Parameter	Value
Population No.	100
Generation No.	300
String No.	480
Crossover rate	0.8
Mutation rate	0.15
Fitness function	$F = \frac{1}{\sum (\hat{\theta}_{i+1} - \hat{\theta}_i)^2 + \sum (\hat{\theta}_{i+1} - \hat{\theta}_i)^2}$

여기서  $t_i, p_i, v_i, a_i$ 는 각 구간에 대한 초기 시간, 위치, 속도, 가속도를 나타내며  $t_f, p_f, v_f, a_f$ 는 각 구간에서의 최종 시간, 위치 속도 가속도를 나타낸다. 궤적 계획 시 각 구간에 대한 초기조건과 최종조건 8개의 정보를 통하여 (5)의 각각의 매개변수에 대한 정보를 (6)-(9)를 통해 구함으로써, (5)을 통해 시간 t에 대한 끝 단의 좌표의 위치인 y(t)를 구할 수 있다. 그러나 5차 다항식 곡선을 이용하여 궤적계획을 수행할 경우, 경유점 중간에서 다리부의 작업범위 밖으로 범위가 벗어날 수 있고, 5차 다항식 곡선을 통한 해석을 통해 말단부분의 움직임이 부드럽게 생성한다고 해도 각 관절의 움직임이 부드러워진다고 보장할 수 없기 때문에, 궤적 생성 시 관절의 부하를 줄이고 에너지를 최적화 할 수 있게 하기 위해 유전알고리즘을 이용하였다. 그림 3은 본 논문에서 적용한 유전알고리즘의 흐름도이다. 본 논문에서 사용된 유전 알고리즘은 보행시 필요한 다리 말단부의 궤적을 최적화시키기 위한 중간 경유점의 속도 가속도를 찾으려는 데 있으며, 이는 기존의 로봇의 보행 궤적을 풀기 위한 수치 해법의 복잡성을 줄이기 위한 방법이다. 시도된 방법은 보행 궤적 자체는 비교적 간단한 형태의 궤적인 삼각형 궤적을 사용하였으며 로봇이 보행할 수 있는 보폭을 12cm로 고정하여 산출하였다. 삼각형 보행을 수행 했을 때 한 보 수행 시 경유점 정보가 5개로 나타나며 이러한 총 5개의 궤적 중에서 중간 경유점에 대해 로봇 관절의 움직임을 최적으로 할 수 있도록 속도 가속도를 유전 알고리즘을 통해 결정하였다. 표 1은 유전 알고리즘을 적용했을 때 각 구성요소이다. 여기서  $\theta_i$ 와  $\ddot{\theta}_i$ 는 각각 임의의 순간의 각 조인트의 각속도와 각가속도를 의미한다. 유전 알고리즘 적용 시 적합도 함수를 각 관절의 속도 가속도의 최소값을 이용함으로써 로봇이 보행 시 각 관절에 걸리는 부하나 충격량을 줄일 수 있도록 하였다. 유전 알고리즘을 적용함에 있어서 돌연변이율을 0.1로 한 후에 교배율을 0.05부터 0.95까지 0.05간격으로 유전 알고리즘을 적용했을 때 0.8에서 수렴 정도가 가장 빨리 나타났다. 이를 기초로 하여 돌연변이율을 0.05부터 0.95까지 돌연변이율을 증가시키면서 알고리즘을 수행한 결과 돌연변이율이 0.15에서 가장 빨리 수렴하는 것을 볼 수 있었고 이에 교배율과 돌연변이율을 표 1과 같이 정의 할 수 있었다. 그리고 세대수의 경우 기본적으로 600번 이상을 수행했을 경우 평균적으로 200회 이상일 경우 적합도 정도가 안정화 됨을 착안하여 300회로 처리하였다. 그림 4는 유전 알고리즘을 적용했을 때의 세대 수에 따른 적합도 추이를 나타낸다.

IV. 모의 실험

본 논문에서는 Microsoft사의 Visual C++을 기본으로 하여 그림 5와 같이 모의실험기를 구축하였다. 모의 실험기는 주어진 궤적에 대해 보행 궤적 생성, 보행 관절 생성 및 이에 대한 각 관절의 토크와 안정성 해석의 기본인 ZMP를 계산해 낼 수 있으며 또 이러한 계산된 결과를 TCP/IP를 통해 로봇의 메인 시스템에 정보를 제공한다. 본 논문에서는 보행을 총 4보 보행을 수행하였으며 각 보행은 3초 보행을 기본으로

총 12초간 보행을 수행하였다.

그림 6, 7, 8은 ISHURO의 4보 보행에 대해 경유점의 위치, 속도, 가속도를 '0'으로 했을 때와 유전 알고리즘을 사용했을 경우의 결과 비교이다. 보통 보행 궤적을 계산할 경우 평균 속도와 평균 가속도를 이용하여 경유점의 보행 궤적을 계산한다. 이에 본 논문에서 평균 속도와 평균 가속도를 이용하여 보행 궤적을 수행할 경우 보행 궤적이 기본적으로 삼각형 궤적을 가지고 있으므로 중간 경유점의 속도 가속도는 '0'가 된다. 이에 본 논문에서는 평균 속도 가속도인 '0'과 유전 알고리즘을 비교하였다. 만일 삼각형 궤적을 사용하지 않고 복잡한 궤적을 사용할 때는 평균, 속도 가속도가 '0'이 아닌 경우도 비교 할 수 있으나 그 역시 에너지적인 관점에서 볼 때 비례적인 결과가 나올것이라 예측이 된다. 따라서 본 논문에서는 그중 가장 간단한 형태인 삼각형 궤적에서의 속도 가속도만을 비교하였다.

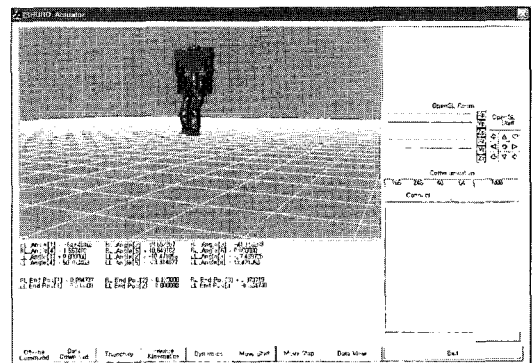
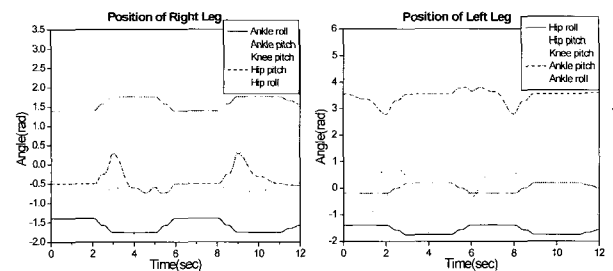
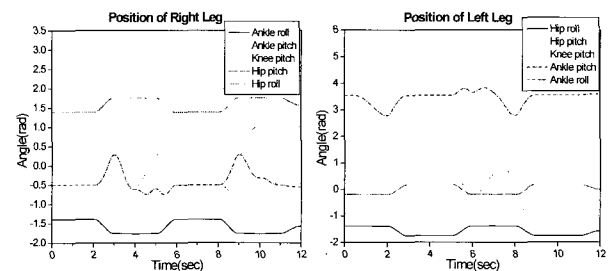


그림 5. 모의실험기 외관.  
Fig. 5. Main feature of 3D simulator.

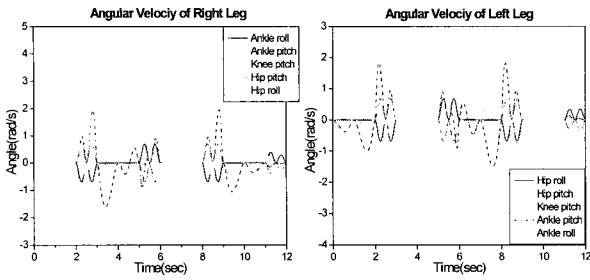


(a) Without genetic algorithm

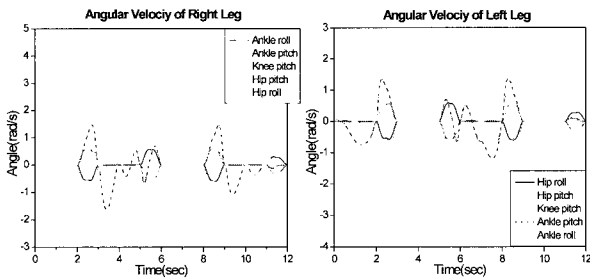


(b) With genetic algorithm

그림 6. 보행 시 각 관절의 위치에 대한 비교.  
Fig. 6. Comparison of position of each joint.



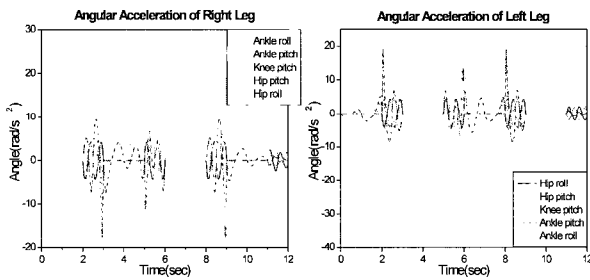
(a) Without genetic algorithm



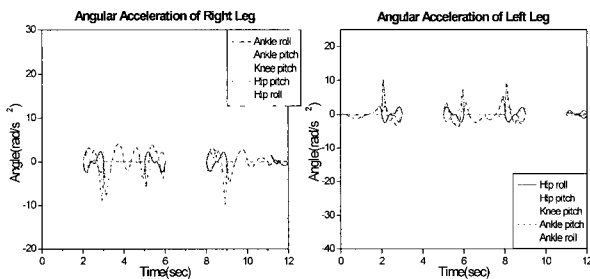
(b) With genetic algorithm

그림 7. 보행 시 각 관절의 속도에 대한 비교.

Fig. 7. Comparison of velocity of each joint.



(a) Without genetic algorithm

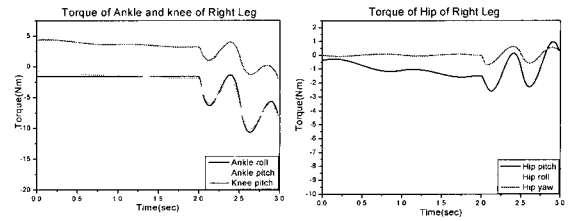


(b) With genetic algorithm

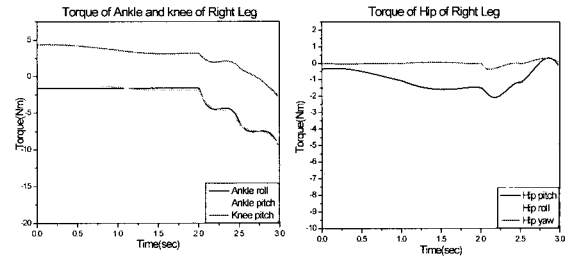
그림 8. 보행 시 각 관절의 가속도 비교.

Fig. 8. Comparison of acceleration of each joint.

그림 6에서 각 관절의 위치상의 움직임은 크게 차이가 없으나 그림 8에 의하면 최대 가속도가 오른쪽 무릎 관절의 경우 유전 알고리즘을 적용하지 않았을 경우 각각 가속도가 최대  $-34.8 \text{ rad/s}^2$  을 나타내나 유전 알고리즘을 적용한 경우 같은 무릎에 대해 각각 가속도가  $19.2 \text{ rad/s}^2$  을 나타냄을 알 수 있다.



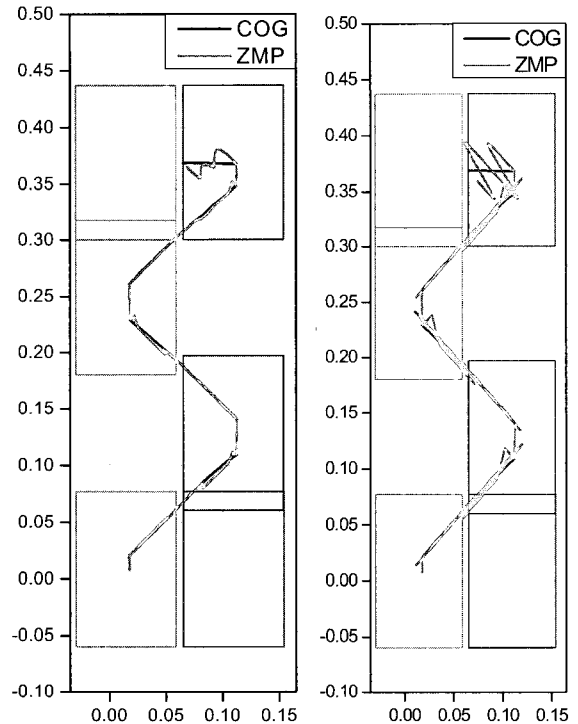
(a) Without genetic algorithm



(b) With genetic algorithm

그림 9. 지지각 에서의 관절의 토크 비교.

Fig. 9. Comparison of joint torque on the support leg.



(a) Without genetic algorithm

(b) With genetic algorithm

그림 10. ZMP 비교.

Fig. 10. ZMP comparison.

이는 유전 알고리즘을 사용했을 경우 약 55%의 최대 가속도가 줄어들음을 의미하며 이는 로봇이 구동 중에 관절에 걸리는 충격량인 저크(Jerk)가 줄어들음을 보여준다. 그림 9는 지지각의 각 관절의 토크를 보여준다.

그림 9에서 한 다리 지지 상태일 경우 경유점 정보를 '0'

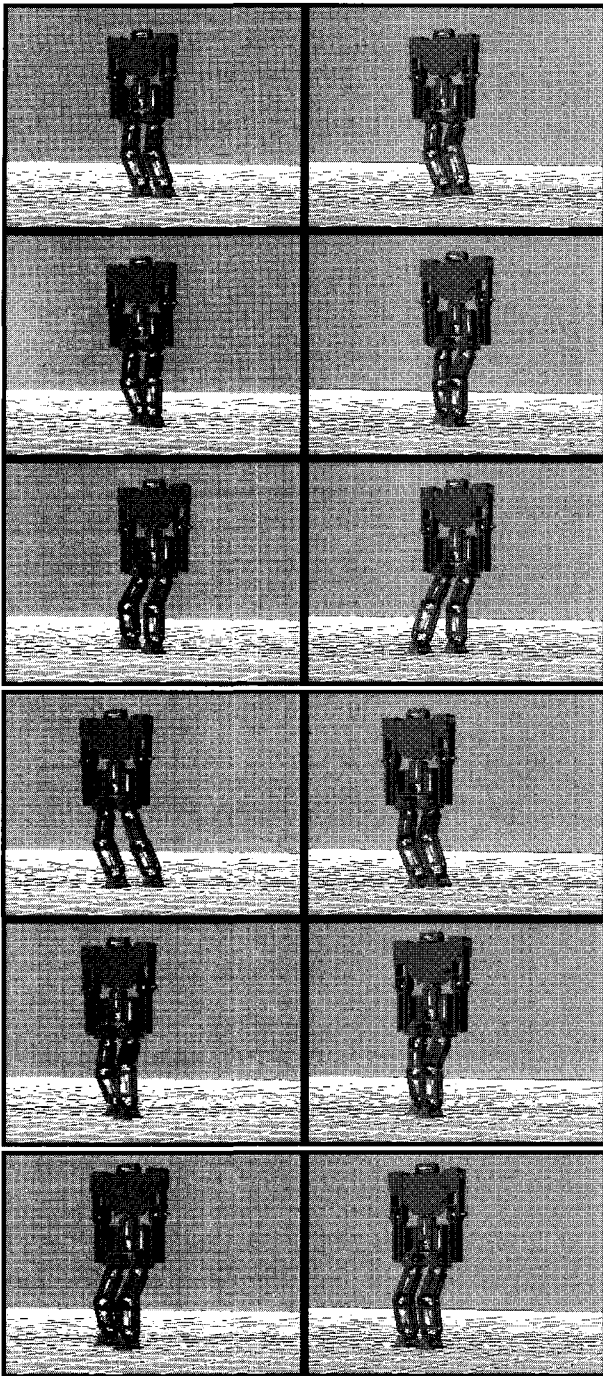


그림 11. 3D 보행 스냅 사진.

Fig. 11. 3D snapshot of walking sequence.

으로 했을 경우 중간 경유점에 의해 각 관절의 토크의 변화가 큼과 동시에 최대로 걸리는 토크를 비교 했을 경우 15%의 토크가 더 소요됨을 알 수 있다. 이는 로봇 구동 중에 에너지 소비가 더욱 심해짐을 보여 주는 것이며 이러한 에너지 소비는 자체 내에 에너지원을 장착해야 하는 휴머노이드 로봇의 특성으로 볼 때 지속적인 구동을 유지하는데 더욱 어려움을 가져다 준다. 그림 10은 유전알고리즘을 적용했을 때와 하지 않았을 경우에 ZMP와 COG(Center of Gravity)에 대한 비교이다. 그림 10에서 발바닥은 사각형으로 표시했으며 그

크기는  $137 \times 84(\text{mm})$ 이다.

COG의 경우 물체의 무게 중심만을 나타내고 있기 때문에 로봇의 가속도 변화에 대한 정적인 안정성에 대해서는 크게 차이가 없으나 ZMP를 비교하였을 경우 중간 경유점에 대해 유전알고리즘을 사용하지 않았을 경우 안정성의 척도인 ZMP의 움직임이 상당히 크게 뒬을 볼 수 있다. 이러한 ZMP 움직임의 요동이 클 경우 실제 보행 안정성을 보장하기 어렵다. 그림 11은 로봇 보행에 대한 3D 형상이다. 그림 11에서는 로봇 보행을 1초 간격으로 12초간 4보 보행을 보여준다. 보행 결과 안정적으로 보행됨을 확인할 수 있었다.

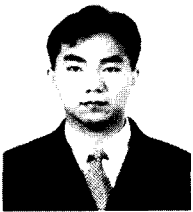
## V. 결론

최근 휴머노이드의 기구적 불안정성을 해결하기 위한 안정보행에 대한 연구가 지속적으로 이루어지고 있다. 본 논문에서는 휴머노이드 로봇의 안정적인 보행을 수행하기 위해 유전알고리즘을 이용하여 보행 궤적을 생성하는 방법을 제시 하였다. 보행 궤적 생성시 안정적인면서 자연스러운 보행을 생성해내기 위해 원하는 보행 보폭에 대해 삼각형 형상의 다리 끝 단의 궤적을 만들게 되는데 이때 다리 궤적 생성 시 보행의 자연스러움을 유지시키기 위해 중간 경유점에 대한 속도 가속도 정보를 유전 알고리즘을 통해 유추하였다. 또한 유추된 정보에 대해 ZMP검증을 통해 보행의 안정성을 확인할 수 있었다. 현재 개발 진행중인 휴머노이드 로봇 ISHURO는 각 모듈의 테스트 및 백래쉬 컨트롤, 그리고 각 모터간의 통신 작업이 완료되어 있는 상태이다. 향후에는 이러한 알고리즘을 실제 로봇에 적용하여 보행 안정성 검증을 수행할 것이며, 또 자연스럽게 안정적인 보행을 위해 FSR센서에 의해 계산된 ZMP를 이용한 ZMP제어를 수행 할 것이다.

## 참고문헌

- [1] Y. Sakagami, R. Watanabe, C. Aoyama, S. Matsunaga, N. Higaki, and K. Fujimura, "The intelligent ASIMO: system overview and integration", *IEEE/RSJ International Conference*, vol. 3, pp. 2478-2483, 2002.
- [2] T. Ishida, Y. Kuroki, J. Yamaguchi, M. Fujita and T. T. Doi, "Motion entertainment by a small humanoid robot based on OPEN-R", *IEEE/RSJ*, pp. 1079-1086, 2001.
- [3] Riezenman, M. J., "Robots stand on own two feet", *Spectrum IEEE*, vol. 39, pp. 24-25, Aug. 2002.
- [4] R. Kurazume, T. Hasegawa, and K. Yoneda, "The sway compensation trajectory for a biped robot", *ICRA '03*, vol. 1, pp. 925-931, 2003.
- [5] J. H. Park and H. Chung, "ZMP compensation by on-line trajectory generation for biped robots", *IEEE SMC*, vol. 4, pp. 960-965, 1999.
- [6] Napoleon, S. Nakaura and M. Sampei, "Balance control analysis of humanoid robot based on ZMP feedback control", *IEEE/RSJ Int. Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 2437-2442, 2002.
- [7] S. Nakaoka, A. Nakazawa, K. Yokoi, H. Hirukawa, and K. Ikeuchi, "Generating whole body motions for a biped humanoid robot from captured human dances", *ICRA '03*, vol. 3, pp. 3905-3910, 2003.

- [8] K. Yamada, S. Komada, M. Ishida, and T. Hori, "Characteristics of servo system using high order disturbance observer", *Conference on Decision and Control*, pp. 3252-3257, 1996.
- [9] K. Yamada, S. Komada, M. Ishida, and T. Hori, "Analysis of servo system realized by disturbance observer", *AMC 96*, pp. 338-343, 1996.
- [10] B.-J. Jung, J.-S. Kong, B.-H. Lee and J.-G. Kim, "Backlash compensation for a humanoid robot using disturbance observer", *IECON04*, 2004.
- [11] A. Konno, N. Kato, S. Shirata, T. Furuta and M. Uchiyama, "Development of a light-weight biped humanoid robot", *IEEE Intl. Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 1565-1570, 2000.
- [12] G. Kinoshita, T. Kimura and M. Shimojo, "Dynamic sensing experiments of reaction force distributions on the sole of a walking humanoid robot", *IEEE Intl. Conference on Intelligent Robot and Systems*, pp. 1413-1418, 2003.
- [13] H. Zhung, J. Wu, and W. Hung, "Optimal planning of robot calibration experiments by genetic algorithms", *Proceedings of the 1996 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, vol. 2, pp. 981-986, Minneapolis, USA, Apr. 22-28, 1996.
- [14] K. Shimojima, N. Kubota, T. Fukuda, "Trajectory planning of reconfigurable redundant manipulator using virus-evolutionary genetic algorithm", *Proceedings of the 1996 IEEE International Conference on Industrial Electronics, Control, and Instrumentation*, vol. 2, pp. 836-841, Taipei, Taiwan Aug. 5-10, 1996.



#### 공 정 식

1978년 서울대 전기공학과 졸업. 1988년 Univ. Of Iowa 전기 및 컴퓨터 공학 졸업(공학박사). 1988년~현재 인하대학교 전자전기 공학부 전기공학과 교수. 관심분야는 비선형 제어, 보행로봇, 지능형 로봇.



#### 김 진 길

1978년 서울대 전기공학과 졸업. 1988년 Univ. Of Iowa 전기 및 컴퓨터 공학 졸업(공학박사). 1988년~현재 인하대학교 전자전기 공학부 전기공학과 교수. 관심분야는 비선형 제어, 보행로봇, 지능형 로봇.



#### 이 보 회

1996년 인하대학교 자동화공학과 졸업(공학박사), 1997년~현재 세명대학교 전기공학과 조교수 재직중. 관심분야는 보행로봇, 기계 자동화.