

개선된 유전 알고리즘 기반의 휴머노이드 로봇의 안정 보행을 위한 제어기 구현

Implementation of the Controller for a Stable Walking of a Humanoid Robot Using Improved Genetic Algorithm

공 정 식*, 이 응 혁, 김 진 겐
(Jung-Shik Kong, Eung-Hyuk Lee, and Jin-Geol Kim)

Abstract : This paper deals with the controller for a stable walking of a humanoid robot using genetic algorithm. A humanoid robot has instability during walking because it isn't fixed on the ground, and its nonlinearities of the joints increase its instability. If controller isn't robust, the robot may fall down at the ground during walking because of its nonlinearities. To solve this problem, robust controller is required to reduce the effect of nonlinearities and to gain the good tracking performance. In this paper, motion controller that is based on fuzzy-sliding mode controller is proposed. This controller can remove the effect of the saturation by limitation of the input voltage. It also includes compensator for reducing the effect of the nonlinearity by backlash and PI controller improving the tracking performance. In here, genetic algorithm is used for searching the optimal gains of the controller. From the given controller, a humanoid robot can moved more preciously. All the processes are investigated through simulations and are verified experimentally in a real joint system for a humanoid robot.

Keywords : humanoid robot, genetic algorithm, fuzzy-sliding mode controller

I. 서론

최근 들어 지능로봇을 위시로 로봇에 대한 다양한 연구가 진행되고 있다. 특히 휴머노이드 로봇에 대한 연구는 지속적이며 혁신적으로 이루어지고 있다. 이러한 휴머노이드 로봇의 대표적인 예로써는 혼다 사의 ASIMO[1], 소니 사의 SDR-4X[2], 후지쯔 사의 HOAP[3,4] 등이 있다. 이러한 휴머노이드 로봇의 연구에 있어서 기본적으로 로봇을 안정적으로 보행시키기 위해서 다양한 알고리즘과 이론들이 적용되고 있다. 이러한 다양한 기술의 예로써는 로봇의 각 관절의 비선형성과 원하는 시간에 원하는 위치까지 로봇 관절을 제어하기 위한 비선형 및 추종 제어 기법들이 있으며[5-8], 각 관절간의 동기화 과정 하에서 보행을 수행할 수 있도록 하는 관리 시스템[9], 상황에 따라 로봇의 움직임을 결정할 수 있도록 하는 궤적 생성 알고리즘[10], 로봇의 각 상황을 인지하고 이에 대해 대처할 수 있는 센서 시스템[11,12] 등이 있다. 그리고 이러한 다양한 시스템 요구 사항을 처리함에 있어 시스템의 각 상황에 맞도록 일을 분배하기 위한 실시간 시스템이 요구된다.

휴머노이드 로봇에서 보행을 안정적으로 수행하기 위한 방법으로써는 로봇을 움직일 때 안정적인 보행을 수행할 수 있도록 보행 궤적에 대한 패턴을 생성하는 방법이 있다. 이러한 보행 패턴 생성시 로봇의 각 관절 제어기에 존재하는 비선형성에 의해 불안정적으로 로봇 관절 제어가 이루어지게 되면 로봇은 안정적인 보행 패턴에도 불구하고 자세 유지

가 어려워지게 된다. 이러한 문제점을 해결하기 위해서는 각 관절 제어기가 로봇이 안고 있는 비선형 문제를 해결하고 보행 패턴을 충실히 제어 할 수 있어야 한다.

본 논문에서는 휴머노이드 로봇 시스템의 기구부 및 구동부에 나타나는 비선형성을 제거하기 위한 퍼지-슬라이딩 모드 기반의 제어기를 제안한다. 이 제어기에는 강건 제어기인 퍼지 슬라이딩 모드 제어기를 통해 모터 시스템에 존재하는 대표적인 비선형성 중에 하나인 포화(saturation)를 제거한다. 그리고 제어기 내에 비교기를 삽입하여 관절의 기어에 의해 발생하는 백래쉬(backlash)를 제거 할 수 있도록 하며, 원활한 궤적 추종을 위한 제어기를 삽입하여 로봇이 안정적이고 정확한 제어를 할 수 있도록 돕도록 한다. 그리고 이러한 퍼지 슬라이딩 모드 제어기를 구성함에 있어서 유전 알고리즘을 적용하여 최적의 제어기를 구성할 수 있도록 한다. 이때 개선된 유전 알고리즘을 이용함으로써 제어기의 최적 이득값을 보다 효율적으로 찾도록 하며 이를 통해 보다 안정된 제어기를 구성할 수 있도록 한다. 본 논문에서는 제안된 제어기에 대해 시뮬레이션과 실험을 통해 이를 검증하였다.

II. 개선된 유전 알고리즘

실시간 환경 하에서 안정적인 하부 관절을 제어함에 있어서 최적의 궤적을 생성하기 위한 방법으로써 유전알고리즘을 적용하였다[13]. 유전 알고리즘을 적용함에 있어서 기존의 유전 알고리즘의 문제를 개선하기 위해 새로이 개선된 유전 알고리즘을 적용하였다.

기존의 유전알고리즘은 크게 두 개의 유전 알고리즘으로 나눌 수 있다. 하나는 이진 유전 알고리즘이고 다른 하나는 십진 절편 유전 알고리즘이다. 각 알고리즘에 대한 기본적인 교배와 돌연변이는 그림 1과 2에 나타내었다.

그림 1에서 이진 유전 알고리즘은 유전 알고리즘의 개념을 쉽게 접근할 수 있는 장점을 가지고 있으나 원하는 값을

* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수 : 2007. 1. 25., 채택확정 : 2007. 2. 17.

공정식 : 대덕대학 마이크로로봇과(jskong@ddc.ac.kr)

이응혁 : 한국산업기술대학교 전자과(ehlee@kpu.ac.kr)

김진겐 : 인하대학교 전자전기공학부(john@inha.ac.kr)

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

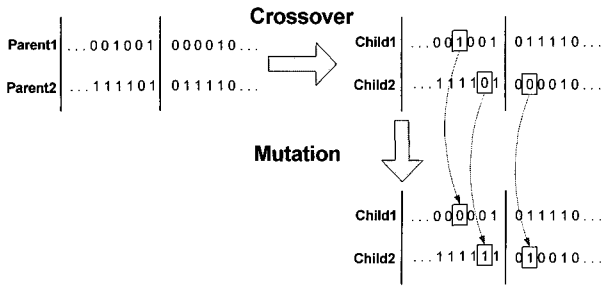


그림 1. 이진 유전 알고리즘의 교배와 돌연변이.
Fig. 1. Crossover and mutation of a binary-coded GA.

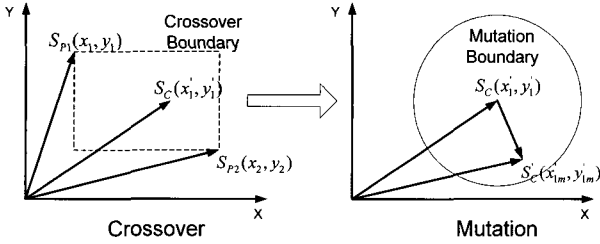


그림 2. 십진-첼면 유전 알고리즘의 교배와 돌연변이.
Fig. 2. Crossover and mutation of decimal-convex GA.

이진수로 표현하기 때문에 이진수의 해상도에 의해 최적의 해를 찾는 데에 한계를 지니게 된다. 그림 2에서 십진 첼면 유전알고리즘을 사용할 경우는 이진 알고리즘에서 발생하는 해상도 문제는 발생하지 않는 장점을 가지고 있지만 세대수가 늘어남에 따라 급격하게 안정상태로 빠져드는데 이 값은 최적 상태의 근처 값이긴 하나 완전한 최적해로 접근하는 데에는 한계를 지니는 단점을 지니고 있다. (1)과 (2)는 십진-첼면 유전알고리즘의 교배와 돌연변이 식을 나타낸다.

$$\begin{aligned} x_1' &= x_1 + (1 - \lambda_1)x_2, & x_2' &= x_2 + (1 - \lambda_2)x_1 \\ y_1' &= y_1 + (1 - \lambda_3)y_2, & y_2' &= y_2 + (1 - \lambda_4)y_1 \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} x_{1M}' &= x_1' + \text{sgn}(\alpha) \times d \times \lambda_m \\ y_{1M}' &= y_1' + \text{sgn}(\alpha) \times d \times \lambda_m \end{aligned} \quad (2)$$

(1)과 (2)에서 (x_1, y_1) 와 (x_2, y_2) 는 각각 부모를 의미하며 이에 의한 (x_1', y_1') 와 (x_2', y_2') 은 교배 결과이고, (x_{1M}', y_{1M}') 는 (x_1', y_1') 의 돌연변이 결과이다. 그리고 $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4, \lambda_m, \alpha$ 는 0과 1 사이의 임의의 값이며 $\text{sgn}(\alpha)$ 는 임의의 값 α 에 대해 0.5 이하 일 때는 0이 되고 0.5 이상 일 때는 1이 되는 함수이다.

이러한 기존의 유전 알고리즘의 단점을 해결하기 위해서 본 논문에서는 유전 알고리즘을 적용함에 있어서 기존의 유전알고리즘을 개선한 알고리즘(Advanced Genetic Algorithm)을 제안하였다. 이 유전 알고리즘은 십진 첼면 알고리즘을 기초로 하고 있으며 시그모이드 함수를 사용하여 일정 세대에 십진-첼면 유전알고리즘이 수렴하는 단점을 보완하여 보다 최적의 해를 찾도록 유도하였다. (3)-(5)는 제안된 알고리즘에 적용된 교배와 돌연변이 식이다.

$$x_{1M}' = x_1' + \delta(t) \times \text{sgn}(\alpha) \times d \times \lambda_m \quad (3)$$

$$y_{1M}' = y_1' + \delta(t) \times \text{sgn}(\alpha) \times d \times \lambda_m$$

$$x_1' = x_1 + \delta(t) \times (1 - \lambda_1)x_2$$

$$x_2' = x_2 + \delta(t) \times (1 - \lambda_2)x_1 \quad (4)$$

$$y_1' = y_1 + \delta(t) \times (1 - \lambda_3)y_2$$

$$y_2' = y_2 + \delta(t) \times (1 - \lambda_4)y_1$$

$$\delta(t) = \left(1 - \frac{1}{1 + e^{-10t+5}} \right), \quad t: \text{generation ratio} \quad (5)$$

(3)과 (4)에서 기존의 십진-첼면 알고리즘에 대해서 시그모이드 함수인 $\delta(t)$ 를 삽입함으로써 초기에 전역적인 탐색을 수행하고 일정 이상의 세대 수 이후에는 보다 지역적인 탐색을 수행함으로써 보다 최적의 해를 탐색할 수 있다. 새로 제안된 유전 알고리즘에 의한 성능은 그림 3과 4에 나타내었다. 그림 3은 각 유전 알고리즘의 평균 적합도 값을 나타내며 그림 4는 각 유전 알고리즘의 최대 적합도 값을 나타낸다.

그림 3에서 이진 유전알고리즘(BGA) 십진-첼면 유전알고리즘(DGA)와 새롭게 제안된 유전 알고리즘(AGA)를 비교하

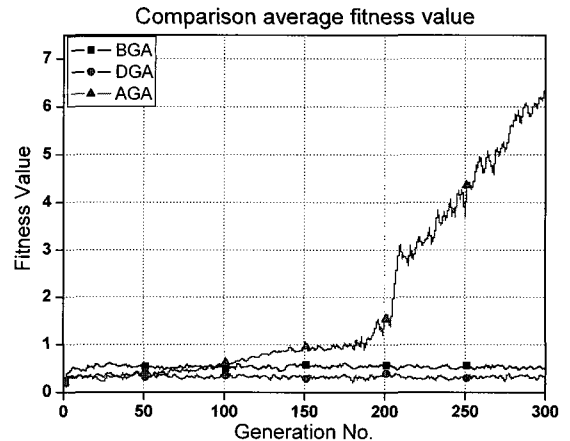


그림 3. 각 유전 알고리즘의 평균 적합도 값의 비교.
Fig. 3. Comparison of average fitness values of each GA.

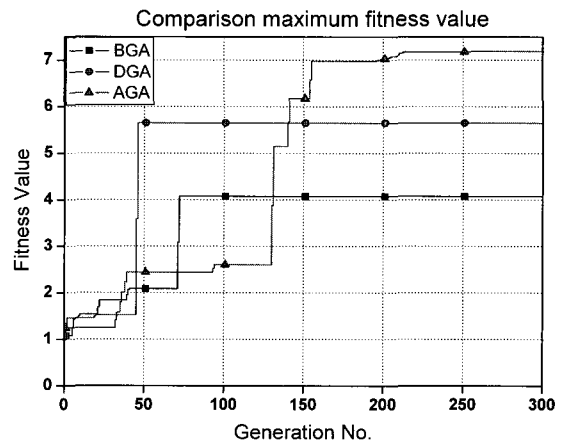


그림 4. 유전 알고리즘의 최대 적합도 값의 비교.
Fig. 4. Comparison of maximum fitness values of each GA.

였을 경우 200세대 이후에 제안된 유전알고리즘에 의한 평균 적합도 값이 급격히 오르는 것을 확인할 수 있었으며, 그림 4에서 비교한 최대 적합도 값을 비교하였을 때도 제안된 유전 알고리즘이 다른 여하의 유전 알고리즘에 비해 최적값에 보다 근접한 값을 추종함을 알 수 있다.

III. 제어기 설계

로봇에는 존재하는 포화나 백래쉬 같은 비선형성을 제거 하면서 제어하는 것이 로봇의 관절 제어에 있어서 중요한 요소이다. 또한, 로봇이 보행을 순조롭게 수행하기 위해서는 로봇 궤적에 대한 추종성에 대한 부분이 제어기에 고려되어야 한다. 이에 본 논문에서는 이러한 비선형성에 대한 고려와 궤적 추종성을 고려하기 위해 그림 5와 같이 제어기를 구성 하였다.

그림 5에서 제안된 모터 제어기는 크게 3개의 부분으로 구성 되어 있다. 첫 번째는 모터 내부에 존재하는 비선형성인 포화에 의한 영향을 제거하기 위해 퍼지-슬라이딩 모드 제어기를 적용하였다. 그리고 외부 구조물을 외란이나 기어에 의해 발생하는 백래쉬에 대한 요소를 추출하고 이를 제어하기 위해 비교기를 구성하였다. 그리고 마지막 부분은 로봇의 궤적을 제어하기 위한 모션 제어를 담당하는 제어부로 나누었다.

먼저 모터의 비선형성을 제어하기 위해 삽입된 퍼지-슬라이딩 모드 제어기를 구현함에 있어서 퍼지화 과정과 추론 규칙을 이용한 퍼지 값 결정, 그리고 비퍼지화 과정을 통해 슬라이딩 모드에 결정되어야 할 슬라이딩 모드 제어기의 이득 값을 결정하였다. 퍼지화 과정에 있어서 받은 입력값은 모터의 속도와 속도의 변화량이며 각각 7개의 중심값을 가진 멤버쉽 함수를 사용하였으며 비퍼지화를 위해 9개의 중심값을 가지고 있는 멤버쉽 함수를 사용하였다. 그림 6은 본 제어기에 적용된 출력 멤버쉽 함수이다.

출력 멤버쉽 함수를 구성할 때, 모터의 방향에 따른 정확한 제어를 위해 출력 멤버쉽 함수를 Z를 기점으로 좌우 대칭이 되도록 설계하였다. 그리고 유전알고리즘을 통해 최적의

PS(NS), PM(NM), PL(NL), PB(NB) 값을 시뮬레이션을 통해 추종하였다. 본 논문에서는 퍼지 슬라이딩 모드 제어기를 적용함에 있어서 비퍼지화 수행 시 요구되는 각 규칙의 해를 제안된 유전 알고리즘을 이용하여 생성하였다.

두번째로 그림 5에서 제안된 비교기이다. 이 비교기는 실제 시스템에 들어가는 퍼지-슬라이딩 모드 제어기와 유전 알고리즘을 통한 모터 식별값을 이용하였다[14]. 실제 시스템에 대비하여 감속비를 제외한 모든 상황을 실제 시스템과 동일화 시키는 과정을 통해 실제 예상되는 모터 출력 위치와 실제 모터의 위치와의 차이, 즉 모터의 백래쉬와 외부 부하에 의해 생성되는 생기는 오차를 계산해 낼 수 있다. 이를 토대로 외부 비선형성에 대한 고려를 할 수 있으며 또 이로부터 궤적 추종성을 향상 시킨다.

마지막으로 주 제어기로부터 들어오는 궤적을 제어하기 위한 궤적 제어기이다. 이 제어 부분은 로봇이 실제 움직임에 대한 궤적을 하부 제어기에 전송할 때, 이 전송된 부분이 오차 없이 제어되게끔 하는 역할을 수행하며 이때 PI 제어기를 적용해 궤적 제어 성능을 향상 시켰다.

IV. 모의 실험

퍼지-슬라이딩 모드 제어기의 최적 이득값을 계산하기 위해 유전알고리즘을 이용하였다. 표 1은 퍼지 슬라이딩 모드 제어기에 사용된 유전 알고리즘의 매개변수이며 표 2는 이를 통해 나온 퍼지 슬라이딩 모드에 대한 이득값이다.

표 1에서 유전 알고리즘을 적용했을 때 기본적인 매개변수는 모터 식별에서 사용한 값과 동일하며 적합도 함수를 모터 시뮬레이션 상에서 발생하는 오차(err)값의 최소값을 최적으로 하기 위한 적합도 함수를 사용하였으며 이때 사용한 궤적은 삼각파를 이용하였다.

표 2에서 Center Value는 비 퍼지화 과정에서의 멤버쉽 함수의 중간값으로 이때의 K_G 는 슬라이딩 모드 제어기에 적용된 퍼지값이다. 이렇게 적용된 결과에 대해 PID제어기, 퍼지 제어기, 퍼지-PID제어기, 제안된 제어기에 대해 로봇 궤적과 가장 유사한 삼각파 입력에 대해 시뮬레이션을 수행하였다. 그림 7은 모의실험에서의 삼각함수 입력에 대한 오차 비교결과이다.

표 1. 퍼지 슬라이딩 모드 제어기에서 사용된 유전알고리즘의 매개 변수.

Table 1. Parameter of genetic algorithm at fuzzy-sliding mode controller.

Gen. No	300	Pop. No.	200
Crossover	0.6	Mutation	0.1
Fitness Function	$fit = 1 / \sum (err)^2$		

표 2. 제안된 유전알고리즘에 의한 퍼지 슬라이딩모드 제어기의 최적 이득값.

Table 2. Optimal value of fuzzy-sliding mode controller by proposed genetic algorithm.

Center Value	0.0	0.061	0.122	0.183	0.245	0.305
K_G	60.74	9.93	79.16	54.49	55.13	80.52

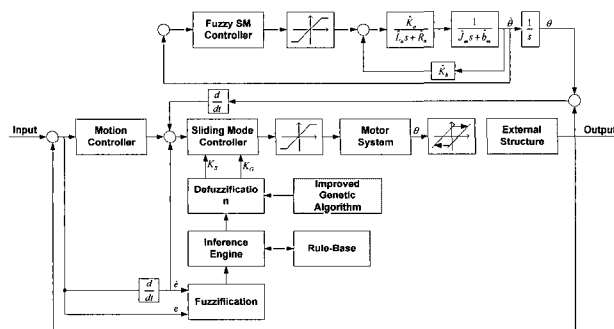


그림 5. 제안된 모터 제어기.

Fig. 5. Proposed motor controller.

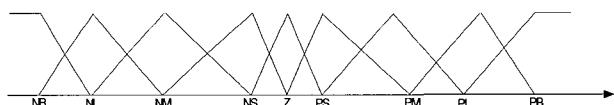


그림 6. 제어기에 사용된 출력 멤버쉽 함수.

Fig. 6. Output membership function applied at controller.

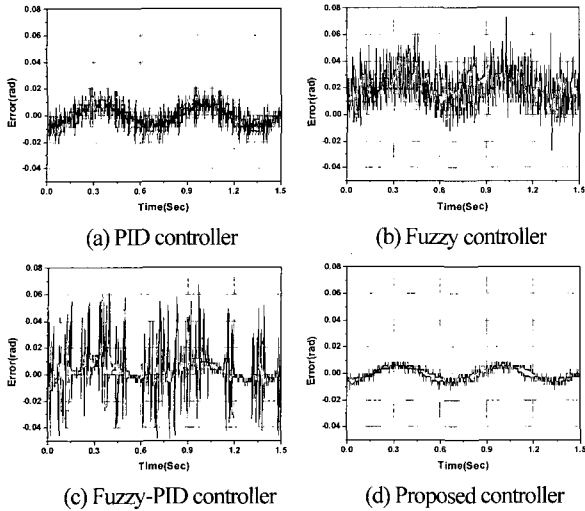


그림 7. 삼각함수에 대한 각 제어기의 모의 실험 비교.
 Fig. 7. Comparison of errors of each controller by sinusoidal input at the simulation.

그림 7에서 실험에 적용된 PID제어기와, 퍼지 제어기, 퍼지-PID제어기와 제안된 제어에 대해 공정한 실험을 수행하기 위해 각각 유전 알고리즘을 이용하여 최적의 이득값을 생성하였다. 이때 적용된 삼각함수 입력은 진폭이 0.920rad로 하였으며 주파수를 1.5Hz로 하였다. 그림 7의 모의실험 결과를 비교하였을 때 그림 7(a)인 PID제어기의 경우 0.021rad 정도의 위치오차가 나타났다. 그림 7(b)인 퍼지 제어 알고리즘의 경우 0.07rad의 위치 오차가 나타났으며 그림 7(c)인 퍼지 PID 제어 알고리즘의 경우 오차가 퍼지 알고리즘에 비해 약간 줄어들어 0.067rad 정도의 최대 오차가 나타났다. 제안된 제어기에 의한 오차는 그림 7(d)에 나타나 있으며 최대 오차는 0.01rad으로 가장 좋은 제어 성능을 보였다.

그리고 이렇게 생성된 제어 이득값을 검증하기 위해 계단 입력을 비교하여 그 성능을 확인하였다 그림 8은 계단 입력에 대한 각 제어기의 모의실험 비교 결과이다. 그림 8(a)의 PID 제어기의 경우 입력값 10.73rad에 대한 출력의 P.O (Percent of Overshoot)이 1.37%이고 settling time이 27ms로 입력에 대해 빠른 응답속도를 나타내고 있으나 모터의 비선형성을 고려했을 때 나타나는 리밋 사이클(limit cycle)이 존재하였다. 리밋 사이클의 크기는 0.001rad이고 주파수는 200Hz였다. 그림 8(b)의 퍼지 제어기를 사용할 경우에는 비선형성에 대한 리밋 사이클이 제거되었으나 settling time이 104ms로 응답속도가 느렸다. 그림 8(c) 퍼지 PID로 제어기를 구현하였을 경우 응답속도는 98ms로 퍼지 제어기에 비해 응답속도가 빨라졌으나 P.O가 12.7%로 과응답이 생겼음을 알 수 있었다. 이에 대해 그림 8(d)의 새로이 제안된 제어기는 P.O가 7.7%이고 settling time이 78ms가 되었다. 로봇 제어에 제일 중요한 부분은 빠른 추종성 확보를 위한 응답속도와 로봇의 에너지 및 토크 특성에 악영향을 미치는 리밋 사이클이 없어야 하므로 응답속도가 빠르면서 리밋 사이클이 없는 제안된 제어인 8(d)가 가장 좋은 성능을 나타낸다.

이러한 실험을 바탕으로 로봇의 안정성의 기초가 되는 ZMP(Zero Moment Point)값을 확인을 통해 로봇 하부 제어기

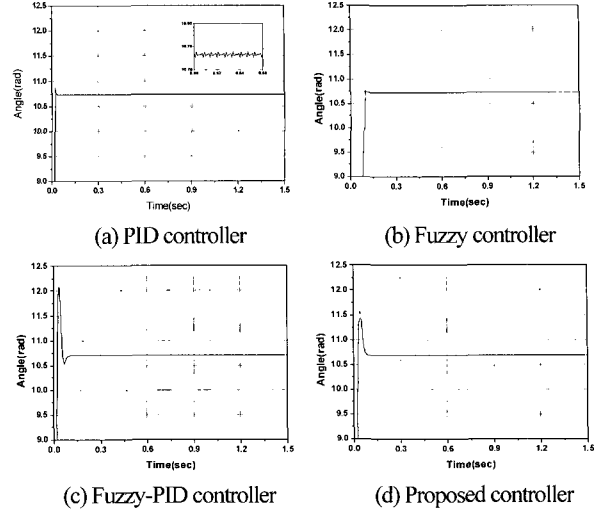


그림 8. 계단 입력에 대한 각 제어기 모의 실험 비교.
 Fig. 8. Comparison of output of each controller by step input at the simulation.

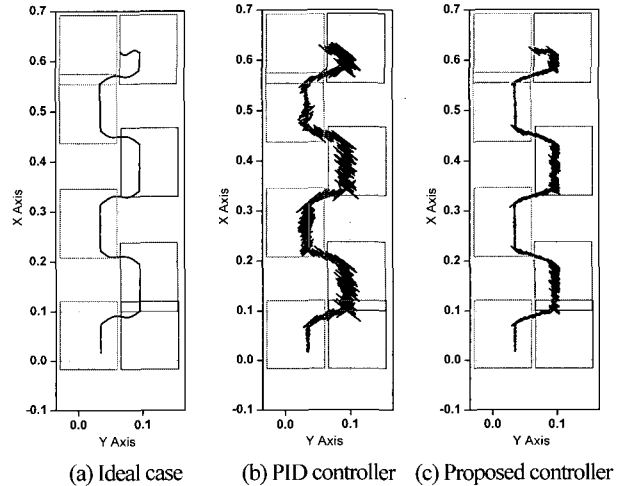


그림 9. ZMP 비교.
 Fig. 9. Comparison of ZMP.

의 안정성이 로봇 전체에 안정성에 미치는 영향을 시뮬레이션 하여 검증하였다. 그림 9는 각각 이상적인 경우와 단순 PID제어기를 삽입하였을 경우 그리고 제안된 제어기를 사용하였을 경우의 ZMP 값을 나타낸다.

그림 9로부터 실제 모터가 이상적인 제어를 수행할 경우, 오차 없이 로봇이 움직인다고 가정할 경우 ZMP는 그림 9(a)와 같이 부드럽고 ZMP정보가 발바닥 내에 존재하는 안정적인 보행을 수행하게 된다. 그러나 실제 모터를 가지고 제어를 할 경우에 로봇의 하부 제어기가 가진 오차에 의해 실제 ZMP와는 다른 패턴으로 움직이게 된다. 즉 그림 9(b)의 경우와 같이 궤적이 ZMP가 로봇 발바닥 내에 존재해서 안정한 상황으로 궤적을 주었음에도 불구하고 하부 제어기가 안정적이지 못할 경우 ZMP가 밖으로 벗어나는 경우가 발생할 수 있지만 그림 9(c)의 경우와 같이 제어기가 휴먼노이드 로봇의 상황에 맞춰 구성되었을 경우 비교적 이상적인 상황을 잘 추종함을 알 수 있다.

V. 실험

모의 실험을 통해 생성된 결과를 기초로 휴머노이드 로봇인 ISHURO-I의 각 관절에 직접 실험을 수행하여 결과를 유추하였고 이를 기초로 로봇 보행에 직접 적용하여 실험을 수행하였다. 그림 10-14는 제안된 제어기를 각 관절에 삽입하였을 때 3초 보행으로 4보 직진 보행을 수행했을 때의 실험 결과이다.

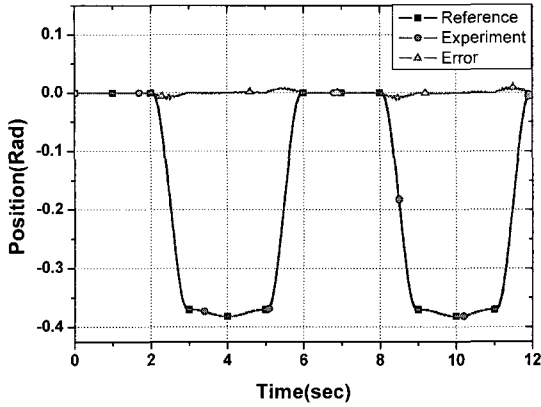


그림 10. 오른쪽 발목 롤에 대한 궤적 실험 결과.
Fig. 10. Experimental result applying ankle roll of right leg.

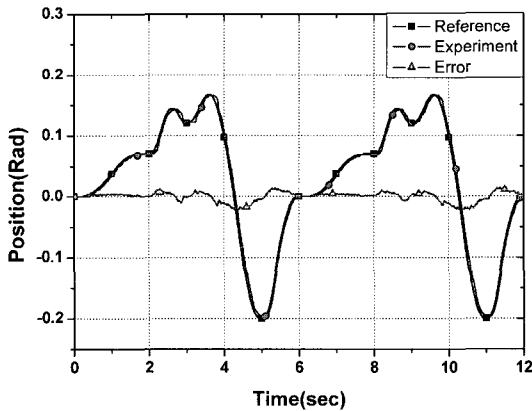


그림 11. 오른쪽 발목 피치에 대한 궤적 실험 결과.
Fig. 11. Experimental result applying ankle pitch of right leg.

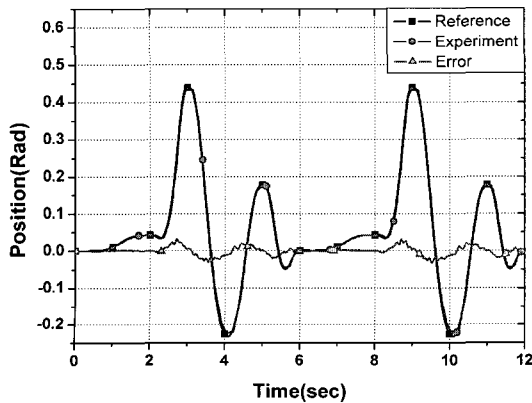


그림 12. 오른쪽 무릎 피치에 대한 궤적 실험 결과.
Fig. 12. Experimental result applying knee pitch of right leg.

그림 10에서 발목의 롤의 경우 최대 오차는 0.013rad이고 오차의 평균은 7.9×10^{-6} rad, 오차의 분산은 0.00171이었다. 그림 11에서 발목의 피치의 경우 최대 오차는 0.022rad, 오차의 평균은 -2.2×10^{-4} rad, 오차의 분산은 0.0064이다. 그림 12에서 무릎의 피치 경우 궤적에 대한 최대 오차는 0.033rad, 오차의 평균은 -8.7×10^{-4} rad, 오차의 분산은 0.0082이었다. 그림 13과 14의 힙일 경우 피치의 경우 최대 오차는 0.019rad, 오차의 평균은 -0.0014rad, 오차의 분산은 0.00498이며 힙의 롤의 경우 최대 오차가 0.0204rad, 오차의 평균은 -0.0055rad, 오차의 분산은 0.006177이었다.

실험 결과에서 휴머노이드 로봇의 다리 관절에 있어서 베벨 기어를 사용한 발목의 피치, 무릎의 피치, 힙의 피치에 대해서는 베벨의 평균 백래쉬인 0.070rad의 영향에 따라 오차가 베벨 기어를 사용하지 않은 관절에 비해 크게 나옴을 알 수 있었으며, 힙 롤 관절의 경우 베벨을 사용하지 않았으나 로봇 토크의 영향에 의해 오차가 같이 베벨 기어를 사용하지 않은 발목에 비해 오차가 크게 발생함을 알 수 있었다.

위의 각 관절에 대한 실험들을 기초로 로봇 보행을 수행하였다. 그림 15는 위의 실험 상황에 대한 보행 실험 결과이다. 그림 15에서 보행 실험은 3초 보행으로 4보 보행을 수행한 결과로써 각 사진은 1초 간격으로 찍은 사진을 나타낸다.

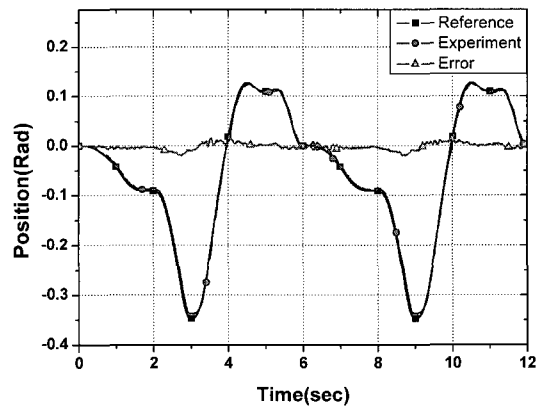


그림 13. 오른쪽 힙 피치에 대한 궤적 실험 결과.
Fig. 13. Experimental result applying hip pitch of right leg.

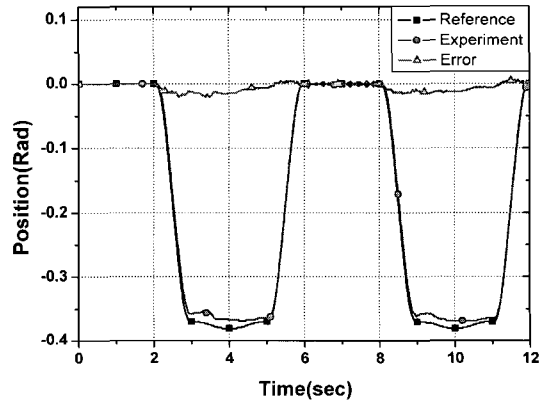


그림 14. 오른쪽 힙 롤에 대한 궤적 실험 결과.
Fig. 14. Experimental result applying hip roll of right leg.

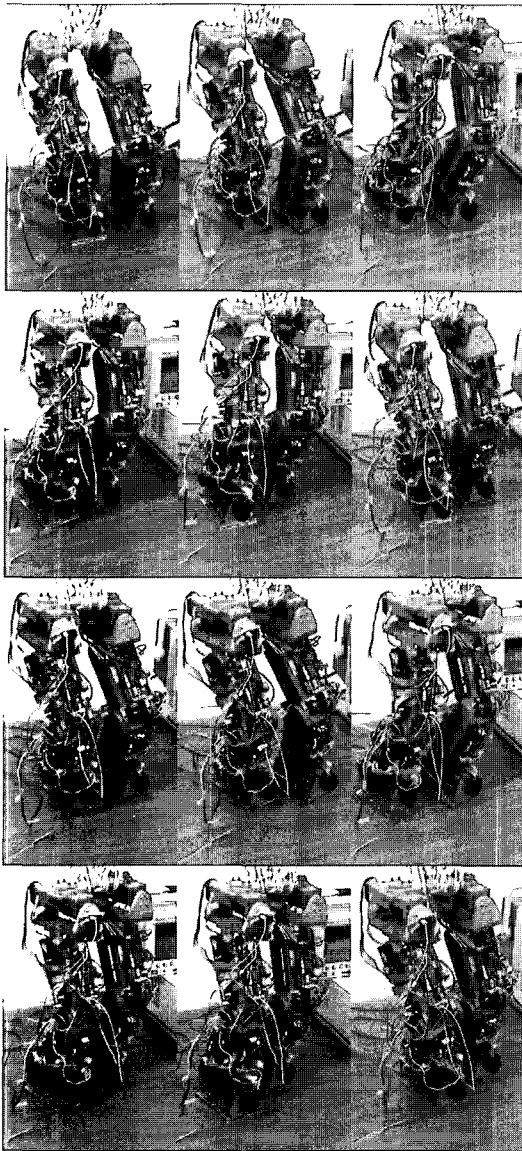


그림 15. ISHURO-I의 보행 실험.

Fig. 15. Walking experiment of ISHURO-I.

VI. 결론

본 논문에서는 휴머노이드 로봇의 안정적 보행을 수행하기 위해 유전알고리즘 기반의 로봇 제어를 구현하였다. 이를 위해 먼저 유전 알고리즘의 성능을 향상시키기 위한 개선된 유전 알고리즘을 제안하였다. 이는 시그모이드 함수를 이용하여 최적해를 보다 정밀하게 찾게끔 하는 방법이다. 이후에 이렇게 지시된 유전 알고리즘을 기초로 로봇의 안정 보행을 수행하도록 하는 제어를 제안하였다. 이는 기본적으로 강건 제어기 중에 하나인 퍼지-슬라이딩 모드 제어를 기본으로 하고 있으며 이때 퍼지 알고리즘을 최적의 상태로 만들기 위해 유전 알고리즘을 적용하였다. 또한 로봇의 외부의 영향에 대해 원만한 제어를 수행할 수 있도록 비교기를 삽입하였으며, 로봇의 궤적 추종성을 향상 시킬 수 있도록 PI제어를 삽입하였다. 이를 통해 로봇이 관절에 존재하는 다양한 비선형성을 제거하면서 궤적 추종성이 향상되어 최종 보행 수행 시 보다 안정적인 보행을 수행할 수 있었다.

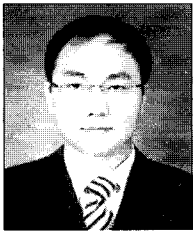
향후 휴머노이드 로봇의 보행 안정성을 증대시키기 위한 모의 실험만이 아닌 실제 보행에 적용하기 위한 ZMP계측 방법에 대한 적용 및 이에 따른 보행의 안정도를 증대시킬 수 있는 방법에 대한 연구가 필요하다. 이를 위한 센서 장착 방법 및 센서 해석 기술이 필요하게 된다. 또한 장애물이나 외부 환경에 보다 친밀하게 움직임을 수행하기 위해 휴머노이드 로봇 시스템의 안정화를 위한 실시간 동역학 해석 및 실시간 동작 생성 알고리즘이 요구되며 또한 비전과 같은 센서 시스템을 이용하여 외부 환경에 보다 유연하게 대처하기 위한 로봇 시스템이 필요하다.

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] M. Fujita, Y. Kuroki, T. Ishida, and T. T. Doi, "Autonomous behavior control architecture of entertainment humanoid robot SDR-4X," *Intelligent Robots and Systems (IROS2003)*, vol. 1, pp. 960 - 967, 2003.
- [3] M. J. Riezenman, "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.-S. Kong, B.-H. Lee, and J.-G. Kim, "Design of a switching PID controller using advanced genetic algorithm for a nonlinear system," *LNAI 3801*, pp. 176-183, 2005.
- [6] P. Yang, X. Kong, Z.-J. Liu, H. Chen, Q. Zhau, and J. Liu, "Hybrid joint controller for humanoid robot," *Int. Conf. on Machine Learning Cybernetics*, pp. 4188-4192, 2005.
- [7] D. Kee, G. WyETH, and J. Roberts, "Biologically inspired joint control for a humanoid robot," *Int. Conf. on Humanoid Robots*, pp. 385-401, 2004.
- [8] B.-J. Jung, J.-S. Kong, B.-H. Lee, S.-M. Ahn, and J.-G. Kim, "Backlash compensation for a humanoid robot using disturbance observer," *Int. Conf. On IECON*, pp. 2042-2047, 2004.
- [9] 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.
- [10] M. Yagi and V. Lumelsky, "Biped robot locomotion in scenes with unknown obstacles," *International Conference on Robotics & Automation*, pp. 375-380, 1999.
- [11] A. Konno, Y. Tanida, K. Abe, and M. Uchiyama, "A plantar H-slip force sensor for humanoid robots to detect the reaction forces," *Intelligent Robots and Systems*, pp. 1470-1475, 2005.
- [12] K. Nichiwaki, Y. Murakami, S. Kagami, Y. Kuniyoshi, M. Inaba, and H. Inoue, "A six-axis force sensor with parallel support mechanism to measure to ground reaction force of humanoid robot," *International conference on Robotics and Automation*, pp. 2277-2282, 2002.
- [13] J.-S. Kong, J.-G. Kim, and B.-H. Lee, "A study on the posture control of a humanoid robot," *Journal of Control, Automation and Systems Engineering*, vol. 11, no. 1, pp. 77-83, 2005.
- [14] J.-S. Kong and J.-G. Kim, "Identification of a motor with

multiple nonlinearities by improved genetic algorithm,” *Lecture*

Notes in Artificial Intelligence, vol. 3483, pp. 981-987, 2005.



공정식

1998년 인하대학교 자동화공학과(공학사), 2006년 인하대학교 대학원 자동화공학과(공학박사). 현재 대덕대학 마이크로 로봇과 전임강사. 관심분야는 휴머노이드 로봇 제어, 표적 제어, 비선형 제어, 실시간 제어, 서비스 로봇 제어.



이응혁

1985년 인하대학교 전자공학과(공학사) 1992년 인하대학교 전자공학과(공학박사), 현재 한국산업기술대학교 전자공학과 교수. 관심분야는 서비스로봇제어, 모바일 헬스케어 시스템, 이미지 프로세싱, 산업제어.



김진걸

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