

휴머노이드 로봇의 안정적 보행을 위한 다중 비선형 제어기 구현

Implementation of Multiple Nonlinearities Control for Stable Walking of a Humanoid Robot

공정식* · 김진걸** · 이보희***

Jung-Shik Kong*, Bo-Hee Lee***, and Jin-Geol Kim**

* 인하대학교 자동화공학과

** 인하대학교 전자전기공학부

*** 세명대학교 전기공학과

요 약

본 논문은 휴머노이드 로봇에 내재되어 있는 다양한 비선형성을 제어하기 위한 비선형 제어기를 제안에 관한 것이다. 기본적으로 휴머노이드 로봇은 기구적으로 불안정성을 내포하고 있고 기어나 모터 드라이버 등에서 다양한 비선형성을 가지고 있다. 이렇게 로봇 안에 존재하는 백래쉬(Backlash)나 포화(Saturation)와 같은 다양한 종류의 비선형성을 제어하는데 있어서 기존의 퍼지 알고리즘, 외란 관측기, 지능 학습망과 같은 제어 기법으로는 다수의 비선형성을 제어하는 데에는 한계를 지닐 수밖에 없다. 이에 본 논문에서는 스위칭 PID를 이용하여 모터 드라이버에 존재하는 포화에 의한 비선형성을 제거 하였으며 백래쉬에 의해 생기는 비선형성의 영향을 제어하기 위해 듀얼 피드백을 이용하였다. 그리고 시스템의 정확한 데이터를 얻기 위해 제어 알고리즘을 적용하기 이전에 모터 시스템에 대해 유전 알고리즘을 이용하여 시스템 식별을 수행하여 모터 시스템을 정확하게 유도하였으며, 시뮬레이션 과정을 통해 최적의 스위칭 PID 제어 이득값을 얻었다. 이렇게 얻어진 모터 식별값과 스위칭 PID제어 이득값을 시뮬레이션과 제안된 로봇인 ISHURO를 이용한 실험을 통해 이를 검증하였다.

Abstract

This paper is concerned with the control of multiple nonlinearities included in a humanoid robot system. A humanoid robot has some problems such as the structural instability, which leads to consider the control of multiple nonlinearities caused by driver parts as well as gear reducer. Saturation and backlash are typical examples of nonlinearities in the system. The conventional algorithms of backlash control were fuzzy algorithm, disturbance observer and neural network, etc. However, it is not easy to control the system by employing only single algorithm since the system usually includes multiple nonlinearities. In this paper, a switching PID is considered for a control of saturation and a dual feedback algorithm is proposed for a backlash control. To implement the above algorithms, the system identification is firstly performed for the minimization of the difference between the results of simulation and experiment, and then the switching PID gains are determined using genetic algorithm with some heuristic approach. The performance of the switching PID controller for saturation and the dual feedback for backlash control is investigated through the simulation. Finally, it is shown that the implemented control system has good results and can be applied to the real humanoid robot system ISHURO.

Key Words : Nonlinear controller, Humanoid robot, Switching PID, Motor identification, Genetic algorithm

1. 서 론

오늘날 산업화의 급속한 발전에 따라 로봇의 비중도 증가하고 있으며 그 모양과 용도 및 기능에 있어서도 많은 다양화가 진전되어 왔다. 작게는 하나의 기계 자동화에서 크게는 공장 시스템 전반의 자동화에 이르며, 인간의 작업 활동이

불가능한 우주 공간이나 심해, 원자로 등에서도 작업을 대신 수행하리라 기대되고 있다. 근래에는 많은 시스템에 인공지능과 비전 및 각종 센서를 장착함으로써 기능 향상을 크게 높이고 있지만 구조적 측면에서 볼 때, 현재까지는 고정용 로봇이 상당수이며 이동 로봇에 있어서도 바퀴나 무한궤도 등의 구름장치를 사용하고 있어 작업 가능 환경이 제한되었다. 따라서 보다 다양한 환경에서의 작업을 가능하게 하기 위해서 인간과 같은 형태의 로봇 시스템 구현의 필요가 요구된다.

현재 휴머노이드 로봇에 관한 연구는 여러 곳에서 활발히 연구되고 있으며, 대표적인 예로 혼다 사의 ASIMO[1], 소니

접수일자 : 2006년 3월 20일

완료일자 : 2006년 4월 10일

감사의 글 : 본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(R01-2003-000-10364-0) 지원으로 수행되었음.

사의 SDR-4X[2, 3], 후지쯔 사의 HOAP[4, 5] 등이 있다. 휴머노이드 로봇은 한 다리 지지 상태에서 균형을 유지하면서 보행을 수행해야 하기 때문에 안정도가 높은 다른 시스템들에 비해 많은 구축이 따르며, 다축 동시 구동 시스템이기 때문에 그 구현에 어려움이 있다. 휴머노이드 로봇의 구현에 있어서 또 다른 특징은 그 자체의 실용성보다 다른 분야에 대한 파급효과가 크다는 점이다. 여유 관절을 갖는 링크의 해석 같은 로봇의 기구적 특성과 운동 특성의 해석은 물론, 다양한 궤적 생성에 따른 주요 관절의 연계성 있는 동작, 사람의 다리를 대신하는 의족의 개발, 그리고 자율주행을 위한 비전 시스템과 균형유지를 위한 중력센서 및 각종 센서의 장착 등, 인간의 보행을 모델로 하는 만큼 다양한 연구가 수행되고 있다[6]. 휴머노이드 로봇을 개발하는데 있어서 구조적으로 백래쉬가 발생하게 되고 모터를 구동함에 있어서는 포화비선형성이 발생하게 된다. 이는 로봇의 안정적 보행을 위한 반드시 제어가 필요한 사항이다. 현재 이런 비선형성을 제어하기 위해 여러 방법들이 연구되고 있다[7, 8]. 본 논문에서는 복수개의 비선형성을 제어하기 위하여 모터가 가지는 포화비선형성은 스위칭 PID제어기를 기구적으로 발생하는 백래쉬를 제어하기 위해서는 이중 피드백 제어를 제안한다.

2. ISHURO 시스템 구조

본 알고리즘을 구현하기 위해 본 논문에서는 시스템으로써 현재 개발 중인 휴머노이드 로봇인 ISHURO를 목표 시스템으로 하였다. 이 휴머노이드 로봇의 특징으로는 첫째 모듈화 개념으로 개발된 휴머노이드 로봇이라는 점이다. 이는 각 관절에 제어 모듈을 내장하고 있음을 의미한다. 두번째로는 출력축에 엔코더를 추가로 부착함으로써 현재 위치의 인식과 백래쉬 측정의 용도로 사용한다는 점이며 마지막으로는 각 피치(pitch)관절에 베벨기어를 사용하여 모터를 수직으로 부착하여 좀더 인간과 비슷한 형상을 가진다는 것이다. 제한된 ISHURO의 전장은 82.5cm, 무게는 6.84kg이며, 다리부 2자유도, 각 팔에 3자유도, 허리에 1자유도, 그리고 머리부에 2자유도를 가져 전체 21자유도를 지닌 로봇이다[9].

구동부에는 Maxon Motor사의 2종류의 DC모터가 사용이 되고 큰 토크가 걸리는 발목의 요(yaw), 무릎의 피치, 힙의 요에 한 종류가 사용이 되고 나머지 한 종류는 발목의 피치, 힙의 피치와 롤(roll)에 사용이 된다. 각각의 모터에 대해 서로 다른 감속비를 가진 2종류의 감속기가 사용된다. 그림 1은 ISHURO의 3D모델과 좌표계 시스템을 나타낸다.

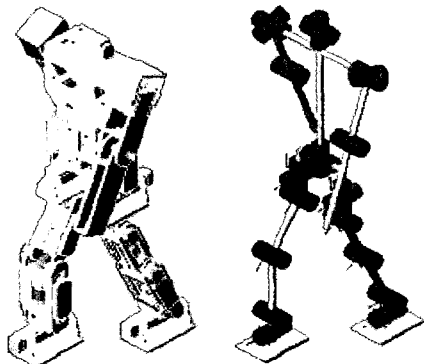


그림 1. ISHURO의 3D 모델 및 좌표계.
Fig. 1. 3D model and coordinate system of ISHURO

ISHURO 시스템은 크게 모의 실험기, 주 제어기 그리고 지역 제어기 3부분으로 나뉘어진다. 모의 실험기는 로봇이 보행하는데 필요한 데이터를 추출하는 역할을 한다. 사용자에게 의해 주어진 경유점의 정보를 바탕으로 5차 스플라인 함수를 이용하여 궤적을 생성하고 역기구학을 통하여 그 궤적에 대한 각 관절값을 계산한다. 순기구학과 순동역학을 이용하여 로봇의 움직임을 3D 그래픽으로 확인할 수 있으며 ZMP(Zero Moment Point)와, 토크를 계산함으로써 움직이는 동안에 로봇의 안정여부와 각 관절에서 발생하는 토크를 확인할 수 있다. 그리고 이 데이터를 무선 네트워크(802.11b)를 이용하여 주 제어기에 전달한다. 그리고 이러한 모의 실험기는 PC를 통해 구현하였다. 그림 2는 ISHURO 제어 시스템을 나타낸다.

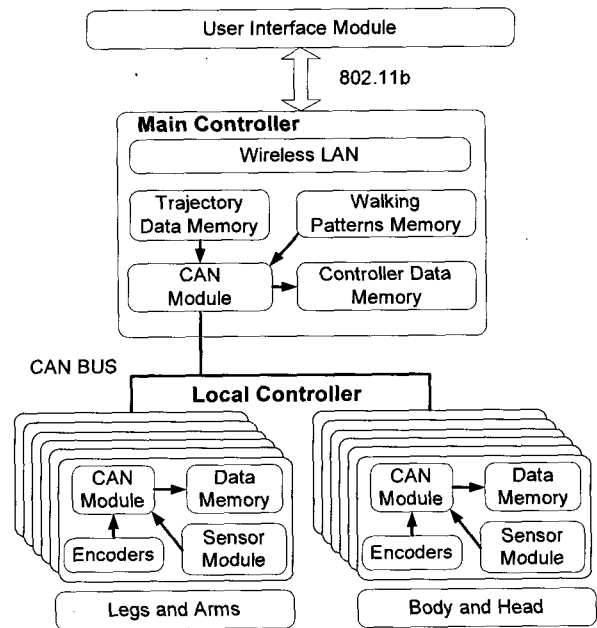


그림 2. 시스템 구조
Fig. 2. System configurations

주 제어기의 경우 Intel 사의 32비트 마이컴을 사용하고 있으며 기본적으로 임베디드 리눅스가 포팅 되어있다. 주 제어기는 기본적으로 모의 실험기에서 받은 각 관절 변수의 정보를 CAN(Controller Area Network) 통신을 통해 지역 제어기에 제공하고 현재 위치에 대한 관절 변수의 정보를 CAN을 통해 지역 제어기로부터 받는다. 이때 주 제어기의 프로세서는 CAN모듈이 없기 때문에 CAN Transceiver를 추가하여 주 제어기와 지역 제어기 간의 통신을 구현하였다. ISHURO 시스템의 경우 구동 모터에 대한 데이터 21개와 이에 대한 현재 출력 값 21개의 데이터를 실시간으로 전송해야 한다. 따라서 CAN 통신상에서 통신속도 500kbp로 하고 40ms의 주기를 가지고 제어를 수행하여 안정성을 확보하였다.

지역 제어기는 모터의 정밀제어, 주 제어기와의 통신, 센서 인식 등을 수행한다. 지역 제어기는 PWM (Pulse Width Modulation) 생성 모듈과 엔코더 인식 모듈을 가지고 있어 모터 제어에 적합한 TI사의 32비트 연산 DSP를 이용하여 구현하였다. 이 CPU는 기본적으로 내부에 CAN통신 모듈을 가지고 있으며 A/D 컨버터를 내장하고 있어 발바닥에 부착되어 있는 FSR(Force Sensing Resister) 센서의 정보를 가지고 올 수 있다. 지역 제어기에는 모터 구동 드라이버가 포

함되어 있다.

3. 모터 모델링

모의실험으로 알고리즘을 적용시켜 그 결과를 판단하여 최적의 제어를 하기 위해서는 우선적으로 시스템에 대한 모델링을 정해야 한다. 하지만 수학적 모델링을 이용한 모의실험과 실제 실험과는 큰 차이를 나타내고 있다. 이는 모델링의 오차에 의한 원인이 가장 크지만 그 밖에도 비선형성의 영향, 측정오차, 실험환경의 변화 등을 들 수가 있다. 그 이유로 아무리 모의실험에서 원하는 제어기를 찾았다고 하더라도 이 변수들을 실제 실험에 적용할 수 있는 신뢰성을 보장할 수가 없다. 제어기 설계 변수들의 신뢰성을 보장하고 시스템 모델링 오차를 최대한으로 줄이기 위하여 유전 알고리즘을 적용, 모델링을 추정한다.

유전 알고리즘은 진화 현상에 기초한 계산 모델로써 병렬적이고 전역적인 탐색 알고리즘이며 주어진 다양한 환경 속에서 적응하여 적합한 것만이 살아남는다는 적자생존의 이론을 기본으로 한 알고리즘이다. 유전 알고리즘은 가능한 해들을 정해진 형태의 자료 구조로 표현한 다음 이들을 재생산, 교배, 돌연변이를 거치면서 점차적으로 더 좋은 해들을 만들어 낸다[10, 11]. 식(1)은 수학적 모터의 전달함수를 나타내고 표 1은 식(1)에 나타난 각 변수들의 물리적 의미를 설명하고 있다[12, 13].

$$\frac{\Theta(s)}{V(s)} = \frac{K_a}{L_a J_m s^3 + (L_a f_m + R_a J_m) s^2 + R_a f_m + K_a K_b s} \quad (1)$$

표 1. 모터 전달함수 변수정의

Table 1. Variable definition of motor transfer function

기호	명칭	단위
$\Theta(s)$	출력각도	radian [rad]
$V(s)$	입력 전압	Voltage [V]
J_m	회전자 관성	4.9×10^{-7} [Kgm ²]
f_m	점성 마찰 계수	1.0472×10^{-7} [Nm]
L_a	아마추어 인덕턴스	3.629×10^{-4} [H]
R_a	아마추어 저항	5.93 [Ω]
K_a	토크 상수	0.01804 [Nm/A]
K_b	역기전력 상수	0.01804 [Vs/rad]

유전 알고리즘을 이용하여 모터의 모델링을 구하기 위하여 식(2)와 같이 모터 전달함수의 각 계수들을 유전 알고리즘의 변수로 설정하고 실제 시스템에서 나온 출력측 위치 데이터를 기준으로 하여 모터의 전달함수를 찾고자 한다.

$$\frac{\Theta(s)}{V(s)} = \frac{c}{s(s^2 + as + b)} \quad (2)$$

이때에 a, b, c는 찾고자 하는 전달함수의 변수를 의미한다. 그림 3은 유전 알고리즘을 이용하여 모터 모델링을 찾는 블록도를 나타낸다.

표 2는 유전 알고리즘을 이용하여 모터 모델링을 찾을 때 사용한 매개 변수들의 값을 나타낸다. 이때 적합도 함수로는 실제 데이터와 모델링 결과와의 차의 제곱에 대한 전체 합

역수를 선택하고 적합함수가 최대가 될 때 모터 모델링은 실제 시스템에 가장 가까운 모델이 된다.

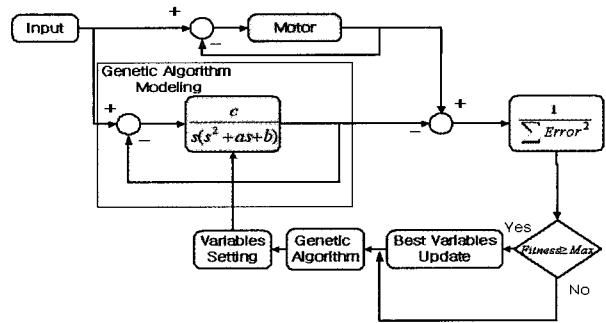


그림 3. 모터 모델링 유전 알고리즘 블록도

Fig. 3. Block diagram of genetic algorithm in a motor modeling

표 2. 모터 모델링 유전 알고리즘의 매개 변수값

Table 2. Parameters of genetic algorithm in motor modeling

개체 수	500	교배율	0.95
세대 수	500	돌연변이율	0.03
변수 길이	90	변수의 개수	3
적합도 함수	$\frac{1}{\sum (Experiment\ Data - Modeling\ Output)^2}$		

식 (3)은 표 1에 나타나는 값으로 찾은 수학적 모델링을 나타내고 식 (4)는 유전알고리즘을 이용하여 찾은 전달함수를 나타낸다.

$$\frac{\Theta(s)}{V(s)} = \frac{110464760.2727}{s(s^2 + 16340.322s + 1992784.27530)} \quad (3)$$

$$\frac{\Theta(s)}{V(s)} = \frac{9991390}{s(s^2 + 2718.94s + 223101)} \quad (4)$$

그림 4는 각 모터의 스텝입력에 대한 유전알고리즘을 이용한 모델링에 대한 출력과 실제 모터의 출력 그리고 수학적 모델링에 대한 출력을 나타낸다.

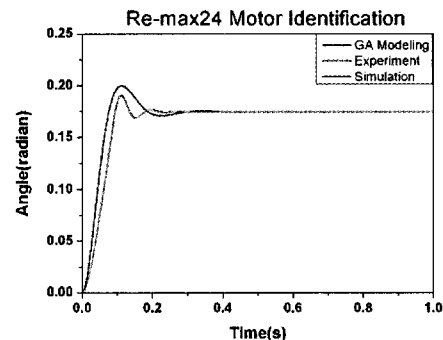


그림 4. 모터 모델링 결과 비교

Fig. 4. Motor modeling using genetic algorithm

모터를 수학적 모델링을 했을 때와 유전 알고리즘을 이용하

여 모델링을 했을 때 오차를 비교하면 26.34%에서 0.63%로 줄어들어 수학적 모델링 보다 유전 알고리즘을 이용하여 모델링 한 것이 실제 시스템과 더 유사하다는 것을 알 수 있다.

4. 이중 비선형 제어

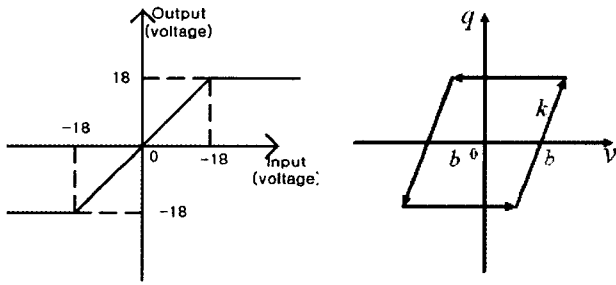
4.1 비선형성

로봇 내에 존재하는 비선형성은 크게 포화화 백래쉬로 나뉜다. 포화화는 모터에 18V 이상은 인가할 수 없기에 생기는 현상이다. 이는 지역제어기의 PWM을 생성하는 것과 밀접한 관계가 있다.

백래쉬는 맞물린 기어의 치와 치 사이의 공간에 의해 만들어진다. 기어 사이의 치열 때문에 운동 방향이 바뀌는 경우 이 공간의 크기만큼 입력축은 돌아가지만 출력축은 돌지 않는 현상이 생기게 된다. 백래쉬는 모터에 장착되어 있는 감속기 자체에서 발생하고 베벨기어를 사용함으로써 발생한다. 이를 입력축과 출력축에 각각 장착되어 있는 엔코더를 이용하여 측정한다. 식(5)은 백래쉬를 수학적으로 나타낸 것이다.

$$\dot{q} = \begin{cases} \dot{v} & \text{if } \dot{v} > 0 \text{ and } q = k(v - b), \\ & \text{or } \dot{v} < 0 \text{ and } q = k(v + b), \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (5)$$

이때 q 는 출력 위치, v 는 입력 위치, k 와 b 는 각각 기울기와 백래쉬의 크기를 나타낸다. 그림 5는 포화화 백래쉬의 그래프를 나타낸다.



(a) 포화 (b) 백래쉬

그림 5. 포화화 백래쉬

Fig. 5. Saturation and backlash

4.2 스위칭 PID 제어기

이 알고리즘은 모터 구동 시 발생하는 포화 문제를 해결하기 위하여 적용시킨다. PID제어기에서는 최적의 해를 구하기 위해 유전알고리즘을 이용하여도 포화의 영향으로 리밋 사이클이 발생하게 된다. 이를 제거하기 위하여 PID의 이득값을 오차의 범위에 따라 변화시킴으로써 PID제어기의 강건성을 최대한 활용할 수 있는 장점이 있다. 본 논문에서는 오차의 범위를 식(6)와 같이 나누었다. 그림 6은 스위칭 PID제어기를 블록도로 나타낸 것이다.

$$\begin{cases} \text{if } |error| < 300 & \text{then PID1} \\ \text{else if } |error| < 200 & \text{then PID2} \\ \text{else if } |error| < 100 & \text{then PID3} \\ \text{otherwise} & \text{then PID4} \end{cases} \quad (6)$$

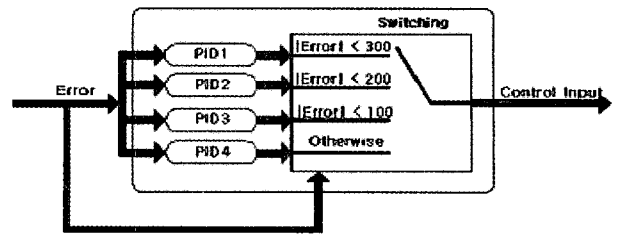


그림 6. 스위칭 PID 제어기 블록도

Fig. 6. Block diagram of switching PID controller

오차의 절대값이 200펄스와 300펄스 사이이면 PID1에 의해 제어되고 오차의 절대값이 100펄스와 200펄스와 사이이면 PID2 제어기, 100펄스 이하이면 PID3 제어기, 300펄스 이상이면 유전 알고리즘으로 찾은 PID이득값을 가지는 PID4에 의해서 각각 제어된다.

4.4 이중 피드백 제어

스위칭 PID 제어기로 포화비선형성의 영향을 제거하였다 하더라도 실제 시스템에서는 감속기와 출력축에 장착되어 있는 베벨기어, 그리고 부하에 의하여 백래쉬가 발생하게 된다. 본 시스템에서는 백래쉬 제어의 필요성을 예상하고 출력축에 엔코더를 하나 더 장착하였고 이를 이용한다. 제안된 알고리즘인 이중 피드백 제어는 입력축 엔코더 제어를 기본으로 하여 백래쉬와 부하의 영향으로 생기는 양을 외란으로 간주하고 입력축과 출력축의 엔코더 값의 차를 이용하여 이를 관측하고 이를 피드백 시킴으로써 백래쉬의 영향을 줄이는 것이다[14, 15]. 그림 7은 제안된 알고리즘의 블록도를 나타낸 것이다.

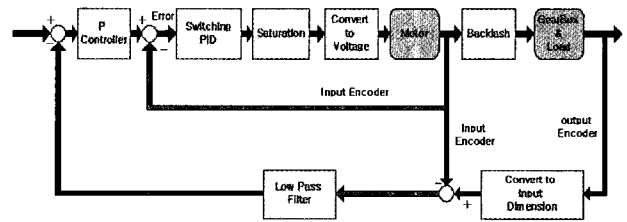


그림 7. 이중 피드백 블록도

Fig. 7. Block diagram of proposed dual feedback

관측된 외란을 1차 저역통과필터로 가공하여 피드백 시키고 이에 대한 오차를 P 제어기를 통과시킴으로써 백래쉬를 제어한다[16].

5. 모의실험 및 실험 결과

5.1 스위칭 PID 제어기

그림 8은 유전알고리즘을 이용한 PID 제어 결과와 스위칭 PID 제어기를 사용한 모의실험과 실제 실험의 결과를 나타낸다. 유전 알고리즘을 이용하여 찾은 PID 이득값을 이용해서 모의실험을 수행했을 때는 0.25, 50Hz의 리밋사이클이 발생하고, 실제 실험에서는 0.03, 167Hz의 리밋사이클이 발생한다. 유전 알고리즘을 이용한 PID 이득값을 기준으로 하고 표 3에서 나타난 바와 같이 오차의 범위에 따른 PID 이득값을 정하여 모의실험을 통하여 포화비선형성에 의해 발생하는 리밋사이클이 제거됨을 확인하고 실제 실험에 적용했을 때에도 리밋사이클이 제거됨을 확인할 수 있다.

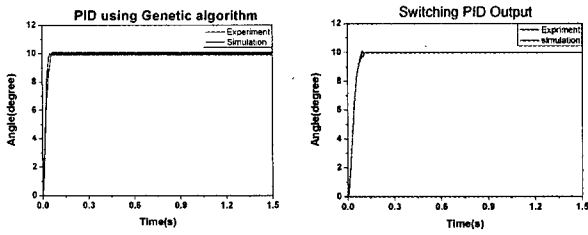


그림 8. 스위칭 PID를 이용한 포화비선형성 제어
Fig. 8. Control of saturation using switching PID controller

표 3. 스위칭 PID 이득값
Table 3. Switching PID gain

	K_p	K_i	K_d
$ error < 300$	60	0	0.2
$ error < 200$	40	0	2.0
$ error < 100$	25	0	0.05
otherwise	2358.32	10.65	45.66

5.2. 백래쉬 측정

입력축 엔코더와 출력축 엔코더를 이용하여 각 관절에 대한 백래쉬를 측정하고 표 4로 나타내었다. 출력축 형태는 감속기가 직접 결합되어 있는 형태와 베벨기어로 구성되어 있는 형태 2가지로 나눌 수 있다. 감속기가 직접 연결되어 있는 형태에서는 사인함수의 입력을 인가시켜 각각의 엔코더로 얻은 결과치를 비교하여 측정하였고 베벨기어로 구성되어 있는 형태의 관절에 대한 백래쉬는 입력축이 움직일 때까지 출력축을 구동시킴으로써 백래쉬 크기를 측정하였다.

표 4. 출력축 형태에 따른 백래쉬 측정값
Table 4. Measurement of backlash

관절	출력축형태	Backlash(degree)
힙 롤	감속기	1.44
힙 피치	베벨기어	6.12
무릎 피치	베벨기어	4.14
발목 피치	베벨기어	3.42
힙, 발목 요	감속기	0.72

5.3 이중 피드백 제어

감속기와 베벨기어 그리고 부하에 의하여 발생하는 백래쉬의 영향을 제거하기 위하여 먼저 그림 9에 나타나 있는 본 시스템의 오른쪽 발목부분 모듈을 이용하여 이중 피드백 제어의 성능을 확인한다. 이를 입력 엔코더만으로 제어할 경우, 출력 엔코더만으로 제어할 경우 그리고 이중 피드백 제어를 할 경우를 각각 비교하여 제안된 알고리즘의 성능이 더 좋을 것을 확인할 수 있다.

본 논문에서는 그림 9에 나타나 있는 모듈 중 발목의 피치 관절에 실제 궤적을 적용시킨다. 입력 엔코더로만 제어한 경우, 출력 엔코더로만 제어한 경우 그리고 제안된 알고리즘을 적용시켰을 경우에 대한 그래프와 이중 피드백을 적용시켰을 때의 출력값과 입력 엔코더로만 제어할 경우와 제안된 알고리즘을 적용시켰을 때 오차를 그림 10에 나타내고 있다.

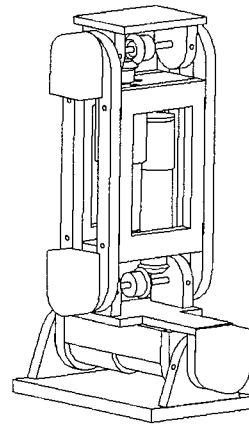


그림 9. 백래쉬 제어 성능 실험 오른쪽 발목 모듈
Fig. 9. Right ankle module for backlash control

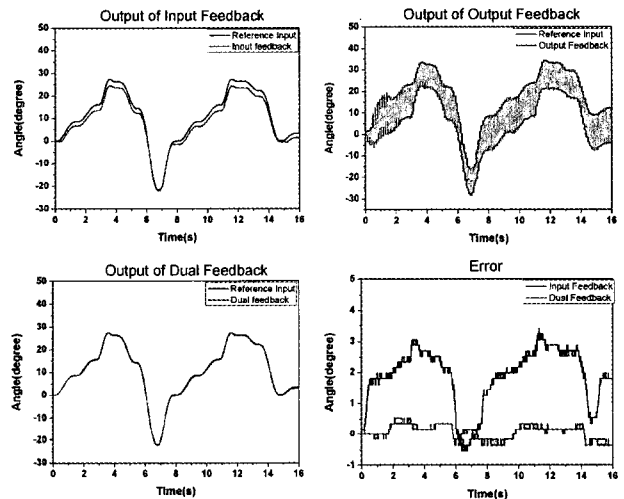


그림 10. 제안된 알고리즘 성능 비교
Fig. 10. Comparison of performance of proposed algorithm

그림 10에서 입력 엔코더로 제어하면 궤적을 제대로 추종하지 못하고, 출력 엔코더를 피드백하여 제어할 경우는 리밋 사이클이 발생함을 볼 수 있다. 하지만 이중 피드백 제어를 적용시킬 경우에는 다른 경우보다 궤적을 잘 따라가는 것을 확인할 수 있다. 오차를 비교해 볼 경우 입력 엔코더를 피드백 시키는 경우는 $-0.54^{\circ} \sim 3.42^{\circ}$ 의 오차를 가지고 이중 피드백으로 제어하는 경우에는 $-0.36^{\circ} \sim 0.54^{\circ}$ 의 오차를 가지고 이 관절이 가지고 있는 백래쉬보다 오차가 작아 백래쉬가 제어됨을 볼 수 있다.

5.4 실험 결과

모의 실험기를 이용하여 찾은 보행 궤적을 실제 로봇에 적용하여 실험하였다. 아래의 그림 11은 발목의 요 관절에 대한 실험 결과이다.

그림 11에서 입력 엔코더만을 피드백 했을 경우 $-0.54^{\circ} \sim 0.54^{\circ}$ 의 오차가 생기지만 제안된 알고리즘을 적용했을 경우에 오차는 $-0.36^{\circ} \sim 0.36^{\circ}$ 로 줄었다. 발목의 요 관절인 경우에는 발바닥만을 부하로 가지기 때문에 오차가 크게 줄지는 않았다. 그림 12는 발목의 피치관절에 이중 피드백 제어를 적용시켰을 때 그 실험결과와 오차를 나타내고 있다.

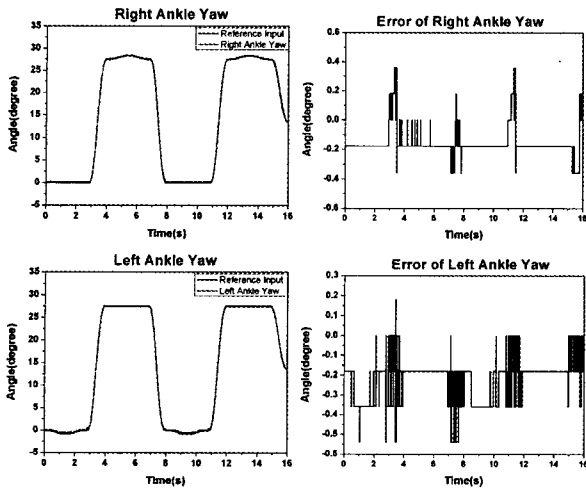


그림 11. 발목 요 관절의 실험 결과 및 오차
Fig. 11. Experiment and error of ankle yaw joint

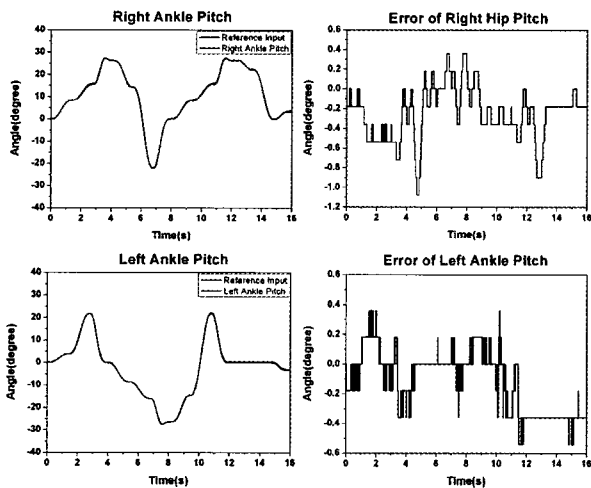


그림 12. 발목 피치 관절의 실험 결과 및 오차
Fig. 12. Experiment and error of ankle pitch joint

발목의 피치 관절은 그림 12에서 설명한 바와 같이 크기는 3.42° 의 오차가 0.54° 로 84.3% 줄었다. 그림 13은 무릎관절의 백래쉬를 제한한 실험결과와 그 오차이다. 그림 13에서 입력 엔코더만을 피드백 했을 때 $-3.06^\circ \sim 3.96^\circ$ 의 오차를 백래쉬 제어 알고리즘을 적용하여 $-0.54^\circ \sim 0.72^\circ$ 로 76.4% 줄었다.

그림 14는 힙의 피치관절의 오른쪽 다리, 왼쪽 다리 대한 실험결과와 이때의 오차를 각각 나타내고 있다. 구동 시 걸리는 부하가 가장 크기 때문에 오차가 가장 크게 나타난다. 백래쉬 제어를 하지 않았을 경우에는 $-10.26^\circ \sim 3.42^\circ$ 의 오차가 제어 했을 경우에 $-1.08^\circ \sim 0.36^\circ$ 로 89.5% 줄었다.

본 논문의 실험결과인 그림 11에서부터 그림 14까지의 결과를 통해 로봇의 각관절의 오차가 제안된 제어기에 의해 줄어들었음을 알 수 있으며 이는 로봇이 보행할 때 발생하는 전체적인 보행 오차를 줄일 수 있게 되어 휴머노이드 로봇이 보다 안정적인 제어를 수행할 수 있게 된다.

6. 결 론

본 논문에서는 휴머노이드 로봇의 안정적 보행을 위해 구

동 시 문제가 되는 포화과 기구적으로 가지는 비선형성인 백래쉬를 스위칭 PID 제어기와 이중 피드백 제어를 이용하여 제어할 수 있음을 보였다. 실제 관절 시스템의 오차를 줄이기 위해 유전 알고리즘을 이용하여 모델링을 하였다. 그리고 시뮬레이션을 통해 스위칭 PID제어기의 이득을 구하였다. 하지만 관절 시스템 내의 감속기와 베벨기어에 의해 생기는 백래쉬와 부하의 가변에 기인한 리미트사이클이 발생하게 되므로 이를 제거하기 위하여 입력 엔코더와 출력 엔코더의 값을 피드백 시키는 이중 피드백 제어 알고리즘을 제안하였다. 제안된 알고리즘은 발목 관절 모델에 적용하여 리미트사이클이 제거됨을 보였고 보행 궤적의 추종성을 개선 시켰다.

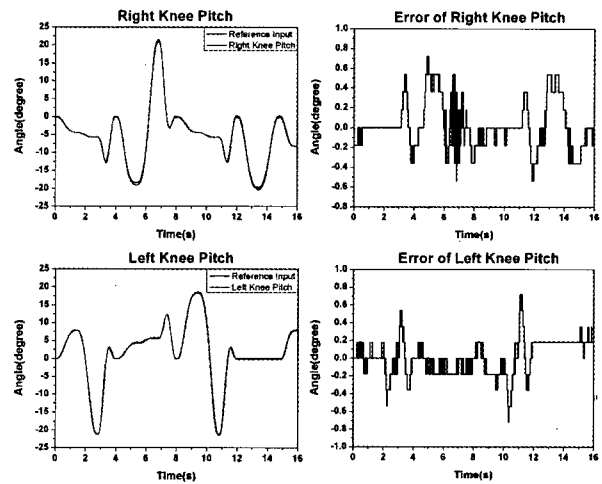


그림 13. 무릎 관절의 실험 결과 및 오차
Fig. 13. Experiment and error of knee joint

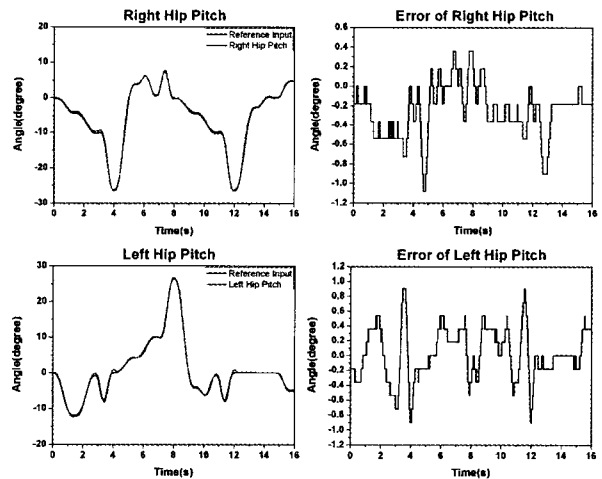


그림 14. 힙 피치 관절의 실험 결과 및 오차
Fig. 14. Experiment and error of hip pitch joint

향후에는 로봇의 안정성을 확보하기 위한 보다 강건한 제어가 필요로 할 것이며 최적의 제어기를 만들기 위한 지능기반의 시스템이 제안되어야 하겠다. 또한 유전알고리즘 처리 시 기존의 유전알고리즘이 가지고 있는 실시간 처리의 어려움을 개선하여 보다 빠른 최적 해를 찾을 수 있는 방법이 연구되어야 하겠다.

참 고 문 헌

[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] Masatsugu Iribe, Tetsuharu Fukushima, Jin'ichi Yamaguchi, and Yoshihiro Kuroki, *Development of a New Actuator for a Small Biped Entertainment Robot Which has Suitable Functions for Humanoid Robots*, IECON 2004, November, 2004.

[4] Riezenman, M. J., *Robots stand on own two feet*, Spectrum IEEE, vol. 39, pp. 24-25, Aug. 2002.

[5] R. Kurazume, T. Hasegawa, and K. Yoneda, "The sway compensation trajectory for a biped robot," ICRA '03, vol. 1, pp. 925-931, 2003

[6] Jung-Shik Kong, Bo-Hee Lee, and Jin-Geol Kim, *A Study on the Gait Generation of a Humanoid Robot Using Genetic Algorithm*, SICE Annual Conference in Sapporo, pp. 187-191, August, 2004.

[7] K.T. Woo, L. Wang, F.L. Lewis, and Z.X. Li, *A Fuzzy System Compensator for Backlash*, in Proceedings of the 1998 IEEE International Conference on Robotics & Automation, pp. 181-186, May, 1998.

[8] N.J. Ahmad and F. Khorrani, *Adaptive Control of Systems with backlash Hysteresis at the Input*, in Proceedings of the American Control Conference on Robotics & Automation, pp. 3018-3022, June, 1999.

[9] Byung-Jae Jung, Jung-Shik Kong, Bo-Hee Lee, Sang-Min Ahn, and Jin-Geol Kim, *Backlash Compensation for a Humanoid Robot Using Disturbance Observer*, IECON 2004, November, 2004.

[10] Mitsuo Gen and Runwei Cheng, "Genetic Algorithms and Engineering Design," John Wiley & Sons, INC, New York, 1997.

[11] Iwasaki M. and Matsui N. "Evolutionary identification algorithm for unknown structured mechatronics systems using GA," IECON 2000. Oct. 2000, pp. 2492 - 2496.

[12] K.S.Fu, R.C.Gonzalez, and C.S.G.Lee, *Robotics: control, sensing, vision, and intelligence*, McGraw-Hill, New York, 1987.

[13] Richard C. Dorf and Robert H. Bishop, *Modern Control Systems*, Prentice Hall, New Jersey, 2001.

[14] S.M. Shahruz, *Performance Enhancement of a Class of a Class of Nonlinear Systems by Disturbance Observers*, IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, Vol. 5, No. 3, pp. 319-323, September, 2000.

[15] S.M. Shahruz, C. Cloet, and M. Tomizuka,

Suppression of Effects of Nonlinearities in a Class of Nonlinear Systems by Disturbance Observers, in Proceedings of the American Control Conference, pp. 2340-2345, May, 2002.

[16] S. Komoda, N. Machii, and T.Hori, *Control of Redundant Manipulators Considering Order of Disturbance Observer*, IEEE Trans. Ind. Electro. Vol. 47, No. 2, pp.413-419, April, 2000.

저 자 소개

공정식(Kong Jung-Shik)

1998년 인하대학교 자동화공학과 학사 졸업.

2006년 인하대학교 자동화공학과 박사 졸업



관심분야 : 유전 알고리즘, 휴머노이드 로봇, 모터 및 모션 제어
 Phone : 032-860-8923
 Fax : 032-863-5822
 E-mail : tempus@dreamwiz.com

김진걸(Kim Jin-Geol)

1988년 Univ. of Iowa 전기 및 컴퓨터 공학과 박사 졸업.

1988년~현재 인하대학교 전자전기공학부 정교수



관심분야 : 로봇 제어, 컴퓨터 및 비선형 제어
 Phone : 032-860-7384
 Fax : 032-863-5822
 E-mail : john@inha.ac.kr

이보희(Lee Bo-Hee)

1997년 인하대학교 기계공학과 자동화 전공 박사 졸업.

1997년~현재 세명대학교 전기공학과 부교수.



관심분야 : 휴머노이드 로봇, 인공지능, 제어 시스템
 Phone : 043-643-1305
 Fax : 043-644-6966
 E-mail : bhlee@semyung.ac.kr