

# 인간형 로봇의 안정성을 위한 백래쉬 보상기 구현

## Implementation of Backlash Compensator for Stability of a Humanoid Robot

정병재\*, 공정식\*\*, 김진걸\*\*\*, 허욱열\*\*\*  
 Byung-jae, Jung\*, Jung-shik, Kong\*\*, Jin-geol, Kim\*\*\*, Uk-youl, Huh\*\*\*

**Abstract** - This paper describes the control of a geared DC motor having a backlash for implementation of a humanoid robot using disturbance observer. Critical problem of the humanoid robot is caused by the nonlinearity such as a backlash. To meet this problem, a control method using disturbance observer has been proposed. The disturbance observer is designed to estimate the effects of nonlinearities in the system, to make the nonlinear system behave linearly. To design the low-pass filter in the disturbance observer, cut-off frequency of the output should be found. The goal of this paper is the implementation of the proposed system, compensating the backlash effect. To accomplish the goal, PD control and disturbance observer are employed to the system with no load and full load. As a result, system stability can be guaranteed by compensating the effect of backlash. In addition, real experiment shows the proposed control methodology will satisfy the stable working of a humanoid type in the future.

**Key Words** : Humanoid Robot, Backlash, Disturbance Observer

### 1. 서론

최근 국내외적으로 이동 로봇에 대한 관심이 증대되고, 또 이러한 관심은 로봇 분야의 기술 발전과 새로운 로봇의 개발로 이루어지고 있다. 이러한 로봇을 설계하는데 있어 기구적으로 불안정성이 포함되고, 백래쉬, 히스테리시스, 데드존 같은 비선형적 요소는 실제적으로 로봇을 구동함에 있어 치명적인 문제점을 야기한다. 그러므로 로봇의 안정성을 확보 하면서 동작하고자 하는 연구가 지속적으로 진행되어 오고 있다.

PID 제어는 예전부터 사용되는 전형적인 제어기 중 하나이다. 하지만 이 제어기를 비선형적 요소가 포함되어 있는 시스템에서 사용하게 되면 여러 문제점이 발생하여 안정적인 제어가 이루어지지 않는 상황이 생긴다. 이를 해결하기 위하여 예전부터 비선형성을 제거하기 위한 연구가 계속되어 왔다[1-2]. 그러한 연구 중의 하나가 외란관측기이다. 이 알고리즘은 비선형적 요소를 외란으로 간주하여 비선형성을 관측, 추정하고 이를 저역통과필터를 사용하여 제거시키는 역할을 한다.

최근 비선형 시스템에 외란관측기를 적용한 여러 사례들이 있다[3-5]. 본 논문에서는 외란관측기를 이용하여 현재 개발 중인 인간형 로봇 ISHURO에 적용하여 이 로봇이 베벨기

어와 감속기를 사용함에 따라 생기는 백래쉬를 제안된 알고리즘을 이용하여 제어됨을 확인한다. 우선적으로 모의실험을 통해 제안된 알고리즘의 성능을 확인하고 기본 모델에 적용시켜 검증하였다.

### 2. ISHURO 시스템 구조

본 알고리즘을 구현하기 위한 시스템은 현재 개발 중인 인간형 로봇인 ISHURO이다. Fig. 1은 ISHURO의 3D모델과 좌표계 시스템이다.

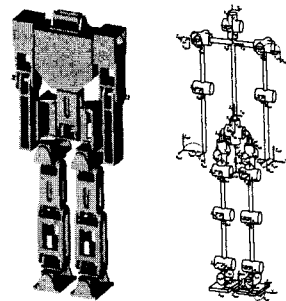


그림 1. ISHURO의 3D 모델링과 좌표계  
 Fig 1. 3D model and coordinate system of ISHURO

ISHURO의 시스템은 기본적으로 모듈화 형태를 기본으로 한다. ISHURO는 전장 75cm, 무게 6.5kg의 로봇이며, 다리부

#### 저자 소개

- \* 인하대학교 전기공학과 석사과정
- \*\* 인하대학교 자동화공학과 박사과정
- \*\*\* 인하대학교 전자·전기공학부

12 자유도, 각 팔에 6 자유도, 허리와 가슴에 각각 1 자유도, 그리고 머리부에 2 자유도를 가져 전체 22 자유도를 지닌다. 각 관절은 Maxon사의 DC모터를 사용하고 있으며 위치와 백래쉬를 측정하기 위해서 각 관절에 2개의 엔코더를 사용한다. 모터에 부착되어 있는 엔코더는 위치를, 출력축 끝에 부착되어 있는 엔코더는 백래쉬를 측정하기 위해 사용된다. 발목과 무릎, 골반의 피치 관절에는 로봇의 크기를 줄이기 위하여 베벨기어를 사용하여 모터를 수직으로 장착한다. 이 로봇은 2가지 종류의 모터를 사용하고 있는데 하나는 큰 토크를 필요로 하는 무릎과 골반의 피치관절에 사용되고 나머지 부분은 또 다른 모터가 사용된다. 그리고 190:1과 231:1의 감속기가 각각의 모터에 부착된다.

그림 2는 ISHURO의 제어 시스템을 나타낸다.

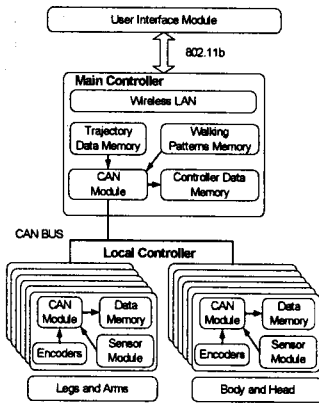


그림 2. ISHURO의 제어시스템  
Fig. 2. System configuration

ISHURO 시스템은 크게 3부분으로 나누어진다. 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. 주 제어기의 경우 Intel 사의 32비트 마이컴인 XScale- 400MHz를 사용하고 있다. 주 제어기는 기본적으로 하부 제어기에 필요한 모터 구동 정보를 제공하고 이에 따른 각 관절 변수의 정보를 CAN통신을 통해 주고 받는다. 마지막으로 하부 제어기는 모터의 정밀제어, 주 제어기와의 통신 센서 인식 등을 수행한다. 하부 제어기는 TI사의 32비트 DSP인 TMS320F2812-150MHz를 이용하여 구현하고 이는 각 관절에 부착된다.

### 3. 외란 관측기

외란 관측기는 비선형적 요소를 다시 선형적 요소와 비선형적 요소의 합으로 분리하여 그 비선형적 요소를 외란으로 간주하고 관측기를 이용하여 그 비선형성을 추정하고 저역통과필터를 사용하여 제거시키는 역할을 한다. 시스템에 외란

관측기를 적용시키면 그림 3과 같은 형태의 시스템이 된다.

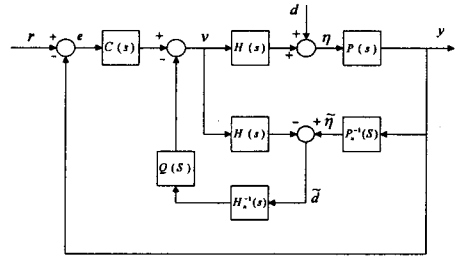


그림 3. 외란 관측기가 적용된 시스템 블록도  
Fig 3. Disturbance observer

여기서,  $C(s)$ 는 제어기,  $P(s)$ 는 플랜트를,  $H(s)$ ,  $P_n(s)$ 는 비선형성과 플랜트의 선형적 수학적 모델링을 각각 나타내고,  $\hat{d}$ 는 추정된 비선형성을 나타낸다.  $Q(s)$ 는 외란관측기의 특성을 결정하는 저역통과필터는 의미한다. 식(1)은 이 저역통과필터의 수식을 나타낸다[6].

$$Q(s) = \frac{\sum_{k=1}^{m-\rho} a_k (\tau s)^k + 1}{\sum_{k=1}^m a_k (\tau s)^k + 1} \quad (1)$$

식(1)에서  $\rho$ 는 저역통과필터의 분자 차수에 대한 상수이며, 최소한  $H(s)$ 와 차수가 같아야 하고, 시정수  $\tau$ 와 계수  $a_k$ 는 양수여야 한다. 저역통과필터를 어떻게 설계하느냐가 외란관측기의 성능을 결정하는데 본 논문에서는 출력의 주파수를 분석하여 컷오프(cut-off) 주파수를 찾아내어 저역통과필터를 설계한다.

### 4. 실험

그림 4는 오른쪽 다리부분으로 실험에 사용된 기본 모델을 나타내고 이 모듈을 이용하여 PD 제어기와 외란관측기의 성능을 비교하고 이를 확장하여 전체 모듈에 적용가능성을 알아보았다.

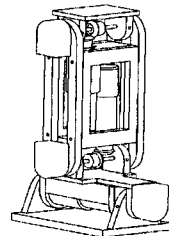
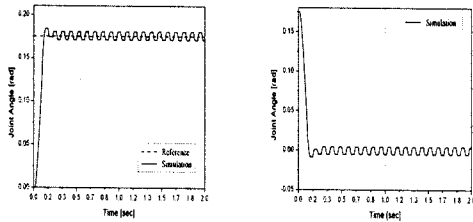


그림 4. 실험에 사용된 기본 모델 구조  
Fig. 4 Experiment structure

모의실험에서 사용된  $P(s)$ 는 3차 시스템이고 모델링 오차를 최소화하기 위하여 유전 알고리즘을 이용하여  $P(s)$ 를 설계하였다. 식(2)는  $P(s)$ 의 수식을 나타내고 이 식(2)는 모터에 인가되는 전압( $V$ )과 출력축 위치( $\theta$ )와의 관계에 대한 식이다.

$$\frac{\Theta(s)}{V(s)} = \frac{4929.7758}{s(s^2 + 2019.8241s + 33407.3658)} \quad (2)$$

입력으로는 0.174532(rad) 크기의 단위 함수를 인가한다. 우선적으로 부하가 걸리지 않은 모델에 PD 제어를 사용하여 제어이득값  $kp = 110, kd = 1.4$ 를 찾아내고 이 PD 제어기를 부하가 걸린 모델에 적용을 시키면 그림 5에서 볼 수 있듯이 리미트사이클이 발생하는 것을 볼 수 있다. 이 때, 0.000587(rad)이라는 백래쉬의 크기를 측정할 수 있고 리미트사이클은 21.27Hz의 주파수와 0.009661(rad)의 크기를 가짐을 확인하였다.



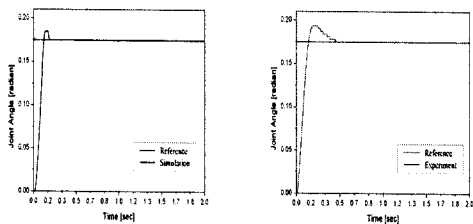
(a) Output (b) Error

그림 5. PD 제어 결과

Fig 5. load model with PD control

식(3)는 그림 5에서 나타나는 결과의 주파수를 분석하여 설계한 외란관측기의 저역통과필터를 나타낸다. 이를 부하가 달린 기본 모델에 적용한 실험결과를 그림 6이 나타내고 있다.

$$Q(s) = \frac{2.39(s+2)(s+10290.9)(s+16.319)}{(s+1)(s+5)(s+10)(s+20)} \quad (3)$$



(a) Simulation (b) Experiment

그림 6. 외란관측기 적용 결과

Fig 6. Load model with Disturbance Observer

위 그림에서 알 수 있듯이 외란관측기가 백래쉬의 영향을 제거할 수 있음을 실험을 통하여 확인하였다.

## 5. 결론 및 향후과제

본 논문에서는 개발 중인 인간형 로봇 ISHURO가 기구적으로 가지는 비선형성이 안정적으로 구동하는데 있어 치명적인 문제점이 있음을 확인하고 이를 효과적으로 제거하기 위하여 외란관측기를 이용한 알고리즘을 제안하였다. 우선적으로 부하가 달려있지 않은 상태에 PD 제어를 적용하여 제어하였으나 부하가 달릴 경우 백래쉬의 영향으로 리미트사이클이 생김을 확인하고 여기에 제안된 외란관측기를 사용한 알고리즘을 이용함으로써 이 백래쉬 영향이 효과적으로 제거됨을 확인하였다. 이번 실험결과는 ISHURO 로봇구동에 있어서의 첫 걸음을 의미한다. 향후 본 논문에서 제안된 알고리즘을 전체 시스템에 확대, 적용하여 이 로봇이 안정적으로 동작할 수 있도록 구현하고자 한다.

## 6. 후기

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

## 참고 문헌

- [1] C.W. Tao, "Fuzzy Control for Linear Plants with Uncertain Output Backlash," IEEE Transaction on system, vol. 32, no. 3, pp. 373-380, June, 2002.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] K. Yamada, S. Komoda, M. Ishida, and T. Hori, "Characteristics of Servo System Using High Order Disturbance Observer," Conference on Decision and Control, pp. 3252-3257, 1996.