

ROBOKER 팔의 제어를 위한 FPGA 기반 비선형 제어기의 임베디드 하드웨어 구현

Embedded Hardware Implementation of an FPGA Based Nonlinear PID Controller for the ROBOKER Arm

김 정 섭, 전 효 원, 정 슬*
(Jeong-Seob Kim, Hyo-won Jeon, and Seul Jung)

Abstract : This paper presents the hardware implementation of nonlinear PID controllers for the ROBOKER humanoid robot arms. To design the nonlinear PID controller on an FPGA chip, nonlinear functions as well as the conventional PID control algorithm have to be implemented by the hardware description language. Therefore, nonlinear functions such as trigonometric or exponential functions are designed on an FPGA chip. Simulation studies of the position control of humanoid arms are conducted and results are compared. Superior performances by the nonlinear PID controllers are confirmed when disturbances are present. Experiments of humanoid robot arm control tasks are conducted to confirm the performance of our hardware design and the simulation results.

Keywords : nonlinear PID, FPGA, floating-point, humanoid robot arms

I. 서론

모터는 대부분의 산업에서 동력을 제공하는 기본 장치로 사용되고 있다. 그에 대한 모터제어기술은 정확한 움직임을 필요로 하는 공작기계나 산업로봇 등에 사용되어지고 있다. 특히 로봇 팔의 제어기술은 실제로 자동차 조립라인의 산업 로봇에 쓰이고 있다. 이처럼 대부분의 제어 방식은 어느 정도 성능을 만족하는 간단한 PID 제어가 주를 이루고 있다 [1,2].

하지만, 시스템의 특성이 비선형일 경우에 선형 제어기인 PID 제어기 만으로는 성능의 한계가 따른다. 또한 시스템 변수의 변화에 따른 고정된 제어기 이득값은 성능을 저하시키는 요인으로 작용되기도 한다.

이러한 PID 제어기의 한계를 극복하고자 많은 제어방식이 제안되었다. 시스템 변수의 변화에 대처할 수 있는 다양한 형태의 적응제어방식이 제안되었는데 안정성을 만족하도록 추종오차를 줄여가는 적응알고리즘을 정하는 것이 중요하다. 적응 제어기의 연장으로 지능제어기는 적응 능력뿐만 아니라 학습 능력을 추가로 제공함으로써 제어성능을 향상시켰다. 퍼지제어기는 이미 우리 주변에서 흔히 볼 수 있는 제어기로 상용화되었으며, 최근에는 하드웨어 기술의 발달로 빠른 연산을 필요로 하는 신경회로망 제어기를 현실화하는 추세이다[3,4].

하지만, 이러한 고급 제어기는 추가적인 하드웨어나 이론적인 어려움, 필요 이상의 성능 등 그에 따른 비용을 지불해야 한다. 따라서, PID 제어기의 간단함과 효율성은 다른 어느 제어기에서 가질 수 없는 큰 장점이다. 여기에 비선형에 대처할 만한 능력이 가해진다면 최고의 제어기가 될 수 있다.

이처럼 선형 PID 제어기에 비선형 능력을 부가한 제어기가 비선형 PID 제어기이다.

최근에 비선형 PID 제어기에 대한 연구가 다시 활발하게 진행되고 있다. 다양한 형태의 비선형 함수를 사용하여 안정성을 보장하는 여러 형태의 비선형 PID 제어기가 제안되었다[5-7].

본 논문에서는 비선형 PID 제어기를 실제 하드웨어로 구현하고자 한다. 이전의 선행연구에서는 PID 제어기를 FPGA 칩에 구현하여 임베디드 제어기로 사용하였다[3,4]. 고정 소수점 연산을 기반으로 구현하였으며, 비선형 함수의 연산은 불가능 하였다. 따라서 본 논문에서는 먼저 시뮬레이션을 통해 비선형 PID 제어기의 성능을 확인하였으며, 부동 소수점 기반의 RISC 구조의 프로세서를 설계하여 비선형 함수를 연산 할 수 있도록 하였다. 그 다음에 비선형 함수를 포함하는 비선형 PID 알고리즘을 구현하여 FPGA 칩에 임베드하였다. 임베디드된 제어기의 성능을 평가하기 위해서 실제 휴머노이드 로봇 팔의 위치추종을 실험하였다. 선형 PID 제어기와 비선형 PID 제어기의 성능을 비교하였다.

II. 비선형 PID 제어기

조인트 공간에서 로봇의 동역학은 아래와 같이 나타낸다.

$$D(q)\ddot{q} + H(q, \dot{q}) = \tau \tag{1}$$

$D(q)$ 는 $n \times n$ 관성행렬, $H(q, \dot{q})$ 는 $n \times 1$ 코리올리스와 원심력 힘, q, \dot{q}, \ddot{q} 는 $n \times 1$ 조인트 각 벡터, 조인트 각속도 벡터, 각 가속도 벡터 그리고 τ 는 $n \times 1$ 토크 벡터이다.

선형 PID 제어기는 다음과 같다.

$$\tau = K_p e + K_I \int e(t) dt + K_D \dot{e} \tag{2}$$

여기서 $e = q_d - q$ 이며 K_p, K_I 와 K_D 는 $n \times n$ 제어 이득 행렬이다. (1)은 비선형이고 coupled 되어 있어 (2)의 제어기로는 원하는 출력응답을 얻을 수 없다. 따라서, 각 조인트에 비

* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수 : 2007. 9. 29., 채택확정 : 2007. 10. 26.

김정섭, 전효원, 정슬 : 충남대학교 메카트로닉스 BK21 그룹
(insideasuram@hotmail.com/atlantia44@hanmail.net/jungs@cnu.ac.kr)

※ 본 연구는 2007년도 산업자원부와 한국산업기술재단의 지역 혁신 인력양성사업에 의하여 연구되었음.

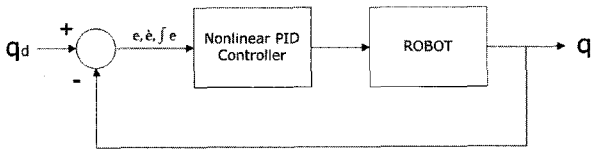


그림 1. 비선형 PID 제어기의 블록다이아그램.
Fig. 1. Block diagram of nonlinear PID control.

선형 PID 제어기를 사용하면 로봇의 비선형성을 해결할 수 있게 된다. 비선형 PID 제어기는 다음과 같고 그림 1에 나타나 있다.

$$\tau = \ddot{q}_d + K_p s(e, \alpha_1) + K_I \int (\dot{e} + \lambda s(e, \alpha_2)) dt + K_{D1} \dot{e} + K_{D2} s(\dot{e}, \alpha_2) \quad (3)$$

여기서 사용하는 비선형식은 아래와 같다[5].

$$s(x, \alpha) = \begin{cases} |x|^\alpha \operatorname{sgn}(x), & \delta < |x| < \beta \\ \frac{x}{\delta^{1-\alpha}}, & |x| \leq \delta \\ \beta^\alpha \operatorname{sgn}(x), & |x| \geq \beta \end{cases} \quad (4)$$

x는 함수에 입력되는 값이며 $\alpha > 0, \delta \in (0, 1]$ 와 $\beta > \delta$ 의 변수와 함께 사용된다.

III. FPGA 구현

1. Overall design structure

그림 2는 FPGA에서 구현된 비선형 PID 제어기의 과정을 나타내고 있다. 먼저 기준값과 센서 데이터 사이의 오차는 비선형 함수 계산을 위해 부동소수점 포맷으로 변환된다. 이 오차를 기반으로 비선형 PID 알고리즘의 연산이 수행된다. (4)의 비선형 함수인 saturated 함수를 통과한 PID 오차는 (3)의 K_p, K_I, K_D 이득값이 곱해져서 더해지게 된다. PID 제어기의 결과는 PWM 파형으로 변환되어 출력된다.

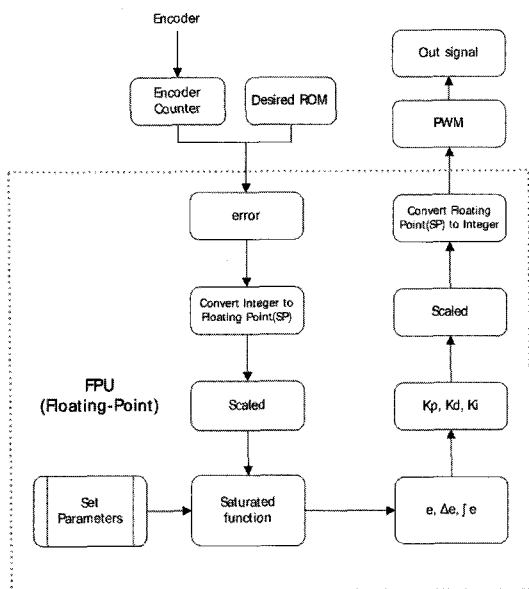


그림 2. 비선형 PID 제어기의 순서.
Fig. 2. Nonlinear PID controller workflow.

2. Core module

부동소수점 프로세서 유닛(FPU; Floating-point Processor Unit)은 비선형 PID 제어기의 핵심 모듈 중 하나이다. 이는 32bit single precision 기반으로 동작을 하며 프로그램 메모리와 데이터 메모리가 분리되어 있는 Harvard 아키텍처를 가지고 있다. 현재 버전의 부동소수점 연산 유닛은 20가지의 명령어를 수행하며 74개의 개별 명령어를 처리할 수 있다.

그림 3은 프로세서 코어의 내부 블록 다이어그램을 나타내고 있다. 코어는 fetch, decode, execute, write-back의 4단계 파이프라인 구조를 가진다. 내부를 구성하는 각 모듈과 그에 대한 설명은 아래와 같다.

- 1) Program memory : instruction code를 담고 있는 이 모듈은 ROM으로 만들어져 있으며 1word는 32bit로 12bit address를 가지는 4,096개의 명령어를 담을 수 있도록 되어 있다. 따라서 Program Memory는 16Kbytes의 용량을 가진다.
- 2) Data memory : 연산에 필요한 데이터가 저장되는 RAM이다. 1word는 32bit로 12bit의 address를 가지며 총 16Kbytes의 용량을 가진다.
- 3) Program counter : 다음 cycle에서 수행되어야 할 명령어가 들어있는 Program Memory의 주소를 지정한다. Status Register를 참조하여 Jump 명령이나 조건 분기 명령을 수행한다.
- 4) Instruction register : Program memory에서 instruction code를 instruction decoder에서 해석하기 위해 instruction을 잠시 1cycle 동안 저장하는 역할을 수행한다.
- 5) Instruction decoder : 미리 정의된 32bit로 이루어진 instruction code를 op code와 operand의 주소 등으로 구분하고 이를 해석하여 코어 내부의 연산을 수행하기 위해 필요한 모듈의 컨트롤 신호를 내 보낸다.
- 6) Status register : Functional unit의 연산 결과에 따른 에러나 코어가 동작 중인지 아닌지 등을 코어 내부의 다른 모듈이나 코어 외부 모듈에서 인지하기 위해 현재의 코어 상

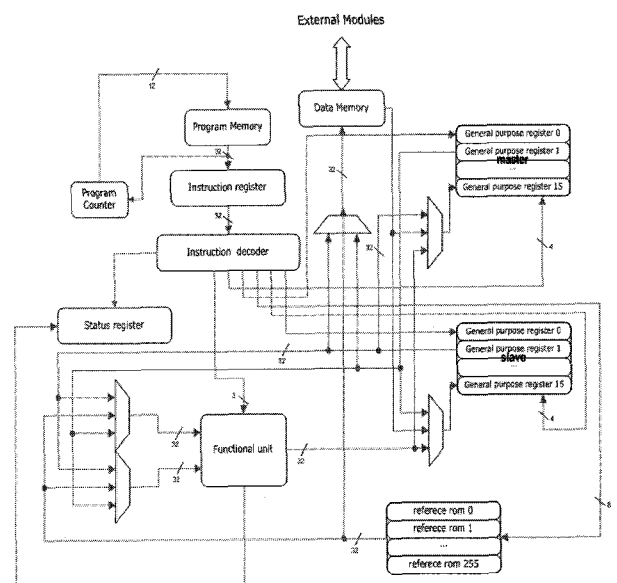


그림 3. 코어 프로세서의 전체 구조.
Fig. 3. Overall structure of a core processor.

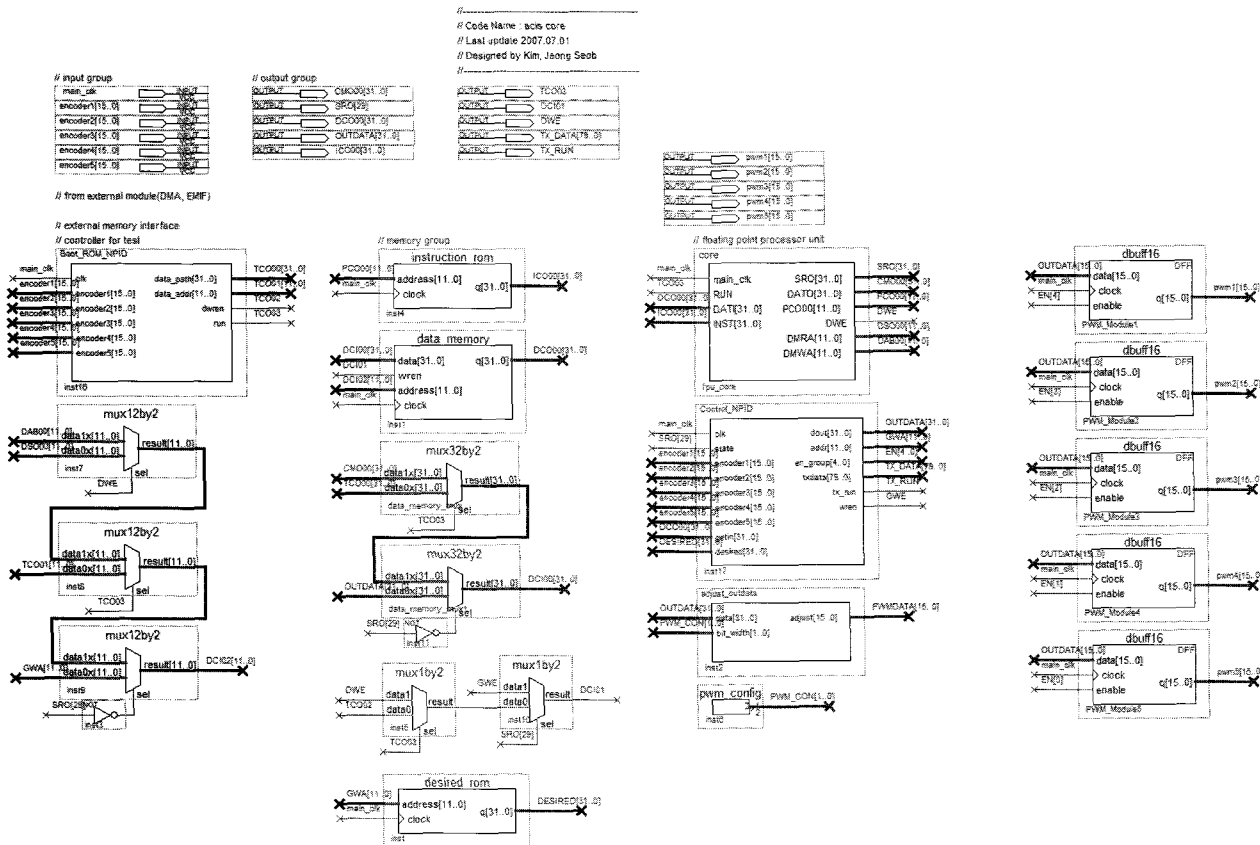


그림 4. Core 모듈 설계.
Fig. 4. Core module design.

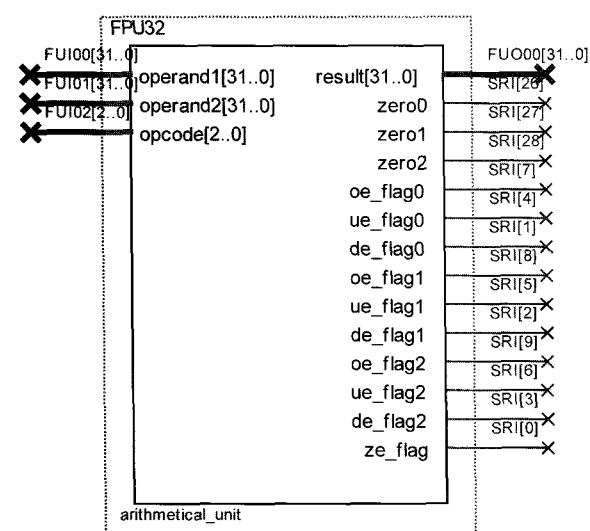


그림 5. 부동소수점 수치연산기.
Fig. 5. Floating point arithmetic unit.

태를 알리는 것을 목적으로 한다. 설계된 프로세서의 특별한 구성요소로는 다음과 같다.

1) Register group : 레지스터 그룹은 master group과 slave group 으로 나뉜다. Functional unit에서 연산을 위한 operand1과 operand2의 source로 사용된다. 이들은 각각 16개의 32bit 레지스터로 구성되어 있다.

2) Reference ROM : 제어 연산에서 자주 참조되는 상수들, 예를 들어 π , 자연상수 e , 그리고 비선형 함수의 수치 해석 연산을 위해 필요한 상수들이 저장되어 있다.

3) Functional unit : 32bit single precision 기반으로 실제적인 연산이 수행되는 모듈이다. 내부에는 32bit 부동 소수점 덧셈기, 뺄셈기, 곱셈기 그리고 나눗셈기가 존재하여, 32bit 부동 소수점 비교기와 부동 소수점 - 고정소수점 컨버터로 구성되어 있다.

부동소수점 기반의 수치연산 모듈은 부동소수점데이터의 덧셈, 뺄셈, 곱셈 그리고 나눗셈을 수행하기 위한 주요 FPGA 모듈이다. 그림 5는 부동소수점 수치연산기 모듈을 나타낸다.

그림 6은 설계된 비선형 PID 제어기를 나타낸다. 제어기는 엔코더 카운터 모듈, PWM 모듈, 시리얼 통신 모듈 그리고 코어 모듈로 구성되어 있다. 코어 모듈에서는 비선형 PID 제어 알고리즘의 연산이 수행된다.

IV. 시뮬레이션 결과

ROBOKER의 팔에 대한 시뮬레이션을 수행하였다. ROBOKER의 팔은 비선형 시스템이다. 커플링된 비선형성 때문에 PID 제어에서는 추종 에러가 발생한다.

그림 7은 비선형 PID 제어기를 이용한 ROBOKER의 팔의 제어를 위한 SIMULINK 블록 다이어그램이다. DH 변수의 계산에 있어서 링크 1은 4kg의 질량과 0m의 길이, 링크 2는

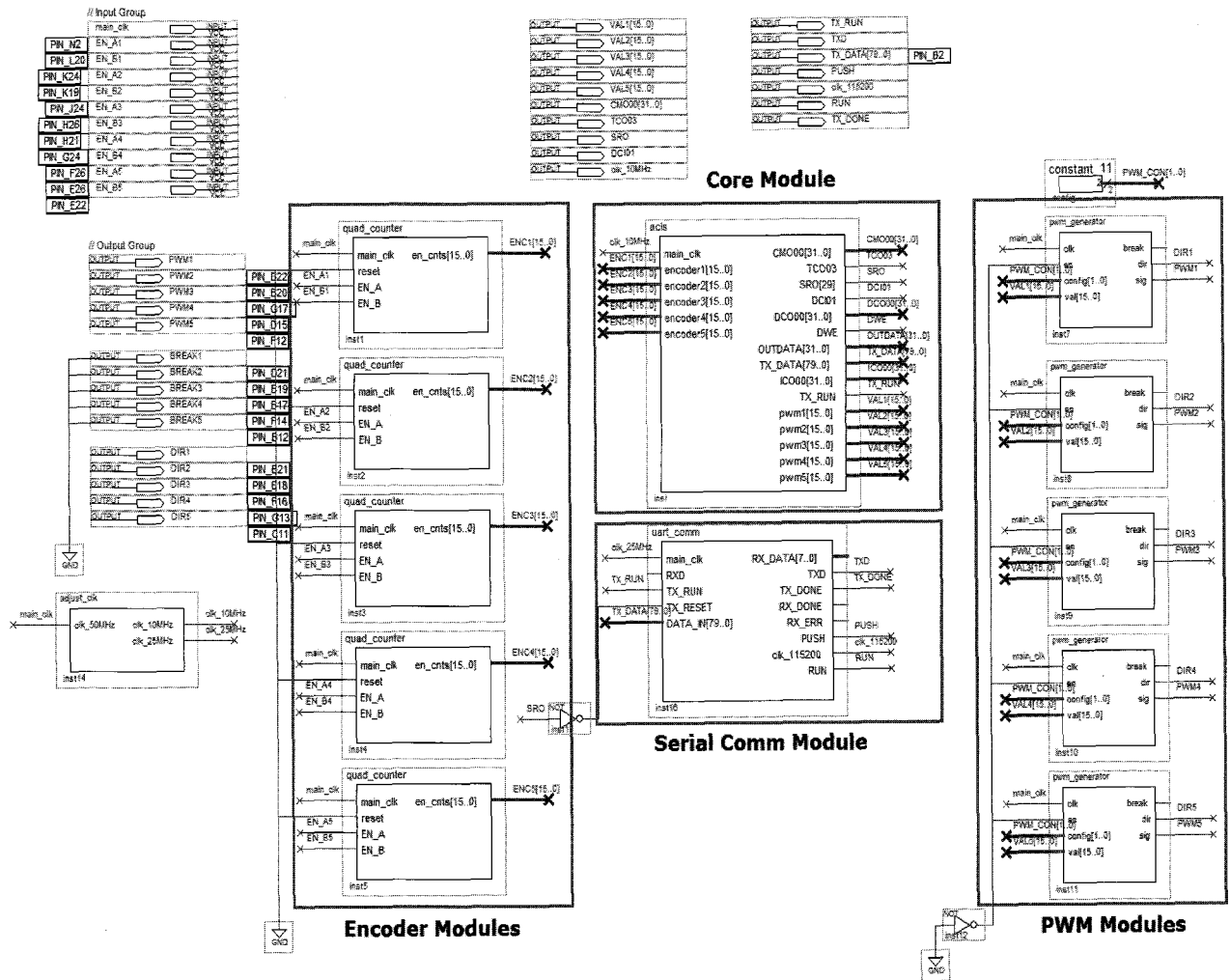


그림 6. 비선형 PID제어기 설계.
Fig. 6. Nonlinear PID controller design.

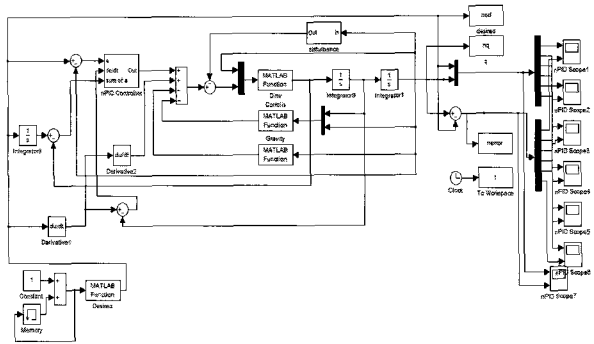


그림 7. 비선형 PID 제어기의 SIMULINK 다이어그램.
Fig. 7. SIMULINK diagram of nonlinear PID control.

2.95kg의 질량과 0.16m의 길이, 링크 3은 2.25kg의 질량과 0m의 길이, 링크 4는 1.75kg의 질량과 0.265m의 길이, 링크 5는 1.5kg의 질량과 0m의 길이 그리고 링크 6은 0.5kg의 질량과 0.235m의 길이를 갖는다. Saturated 함수 변수는 $\alpha_1 = 0.28$, $\alpha_2 = 0.5$, $\alpha_a = 0.6$, $\lambda = 1.1$, $\delta = 0.1$ 그리고 $\beta = 1.5$ 로 선정하였다.

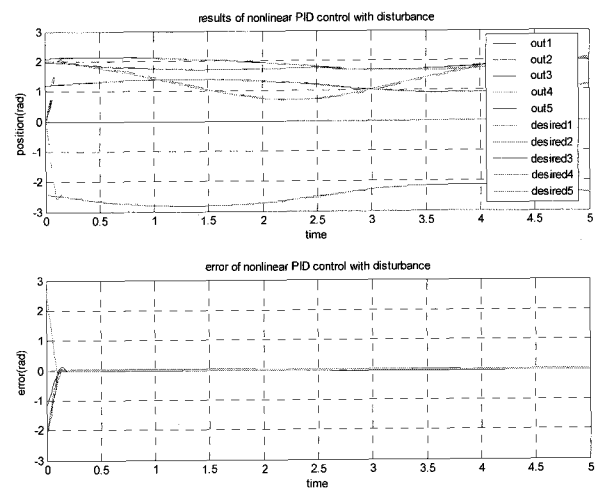


그림 8. 비선형 제어기의 시뮬레이션 결과.
Fig. 8. Simulation result of 비선형 PID 제어기.

그림 8은 로봇 팔 끝에 영향을 미치지 않은 마지막 축을 제외한 5축에 대한 ROBOKER 팔의 비선형 PID 제어의 시뮬

레이션 결과를 나타내고 있다. 외란이 있을 경우에 PID 제어의 경우에는 추종 에러가 발생하는 것에 비해 비선형 PID 제어에서는 에러의 크기가 많이 줄어드는 것으로 나타났다. 따라서 선형 PID 제어기보다 비선형 PID 제어기의 향상된 동작의 수행이 가능하다.

V. 실험결과

실험은 그림 9의 ROBOKER를 통해 수행되었다. ROBOKER는 각각 6 DOF의 자유도를 가지는 두 개의 팔을 가지고 있다. 또한 머리에도 2DOF의 자유도를 가진다.

표 1과 표 2는 비선형 PID 제어기에서 사용되는 변수 값들을 보여준다. 표에 나타난 값들은 시뮬레이션과 실제 반복적인 실험을 통해 구해주었다.

위치 추종 실험을 위해 PID 제어기와 비선형 PID 제어기에서의 결과를 비교하여 그래프를 그렸다. 각 조인트에 대한 위치 추종결과를 나타내었다. 그림 10은 조인트 1에서의 PID 제어 결과를 보여준다. 최대 0.07 라디안의 에러가 나타났다. 조인트 1의 비선형 PID 제어 결과는 그림 11과 같이 최대 0.02 라디안의 에러로 더 작을 것을 알 수 있다.

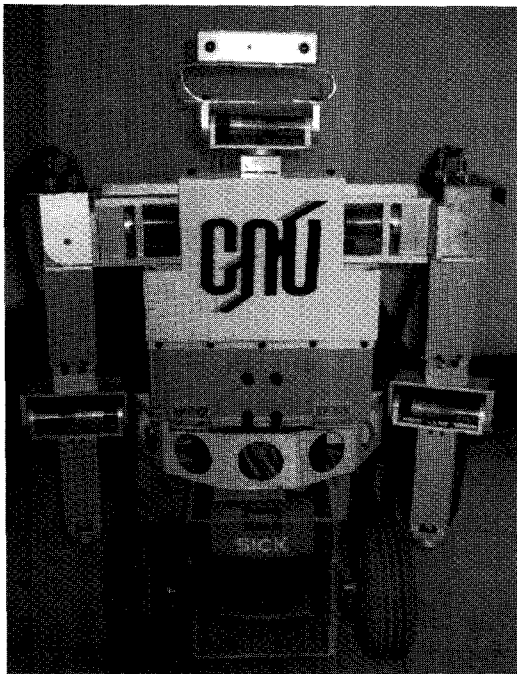


그림 9. 로보커.
Fig. 9. The ROBOKER.

표 1. 비선형 함수의 변수.

Table 1. Parameters of saturated function.

Parameter	Value
α_1	0.28
α_2	0.5
α_3	0.6
β	1.5
δ	0.1
λ	1.1

표 2. PID 게인값.

Table 2. PID gains.

Parameter		Value
Joint1	K_P	7,000
	K_{D1}	20
	K_{D2}	200
	K_I	1
Joint2	K_P	7,000
	K_{D1}	25
	K_{D2}	250
	K_I	3
Joint3	K_P	7,500
	K_{D1}	20
	K_{D2}	200
	K_I	1
Joint4	K_P	2,800
	K_{D1}	25
	K_{D2}	250
	K_I	3
Joint5	K_P	2,300
	K_{D1}	15
	K_{D2}	150
	K_I	2

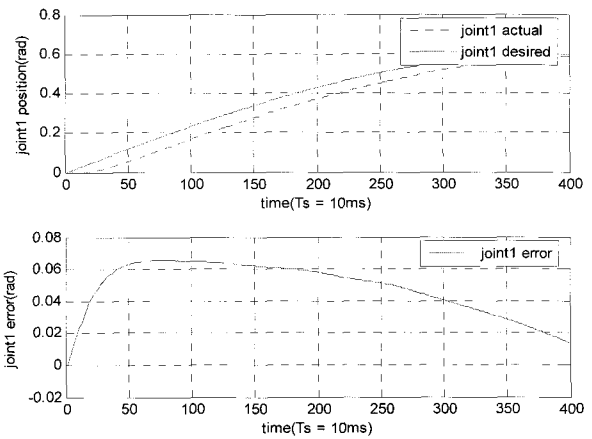


그림 10. 선형 PID 제어기의 조인트 1의 추종 결과.
Fig. 10. Tracking result of joint 1 by PID controller.

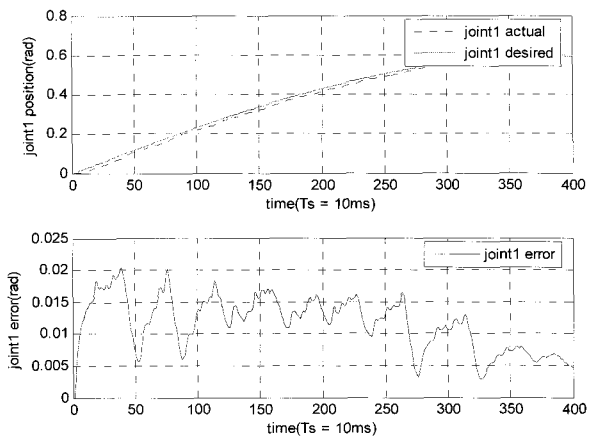


그림 11. 비선형 PID 제어기의 조인트 1의 추종 결과.
Fig. 11. Result of joint 1 by nonlinear PID control.

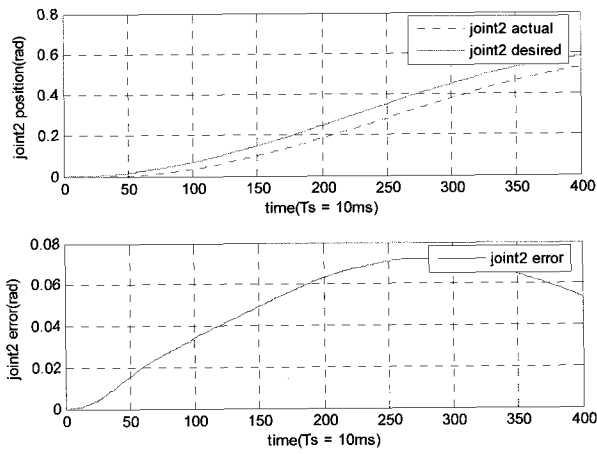


그림 12. 선형 PID 제어기의 조인트 2의 추종 결과.
Fig. 12. Tracking result of joint2 by PID controller.

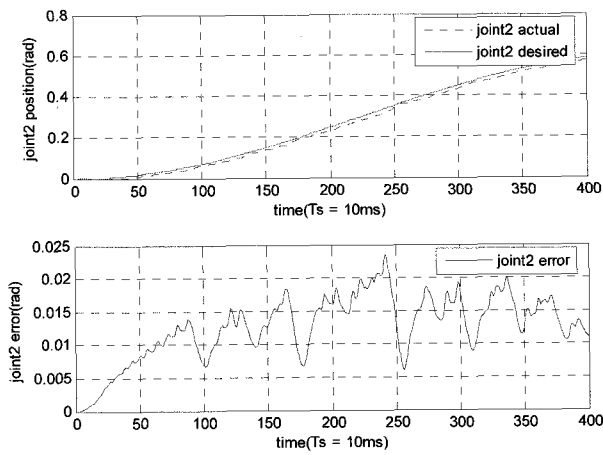


그림 13. 비선형 PID 제어기의 조인트 2의 추종 결과.
Fig. 13. Result of joint2 by nonlinear PID control.

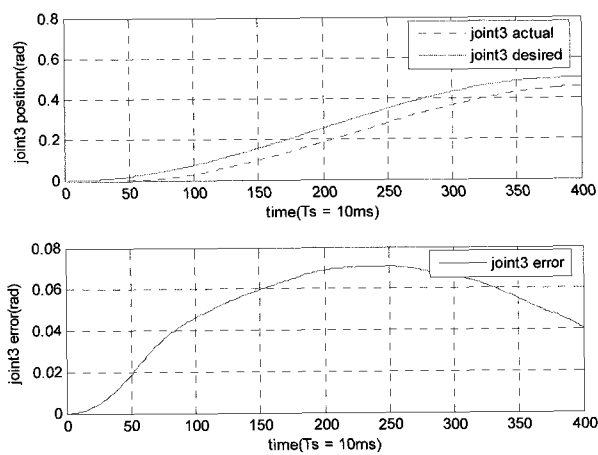


그림 14. 선형 PID 제어기의 조인트 3의 추종 결과.
Fig. 14. Tracking result of joint3 by PID controller.

그림 12와 그림 13은 조인트 2에 대한 PID 제어와 비선형 PID 제어에 대한 실험 결과를 각각 보여준다. 추종 에러는 비선형 PID 제어기에 의해서 더 작아지는 것을 볼 수 있다.

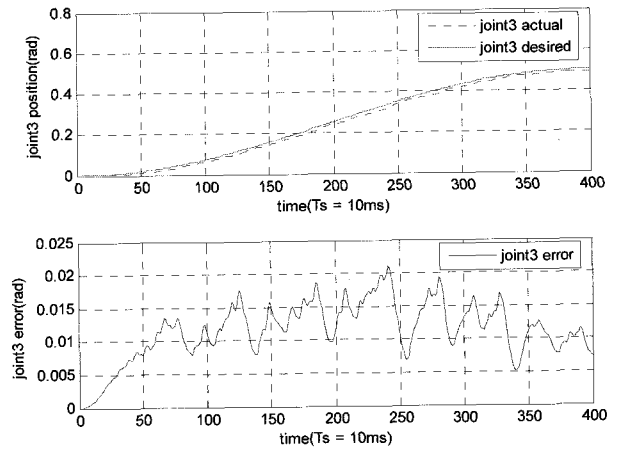


그림 15. 비선형 PID 제어기의 조인트 3의 추종 결과.
Fig. 15. Result of joint3 by nonlinear PID control.

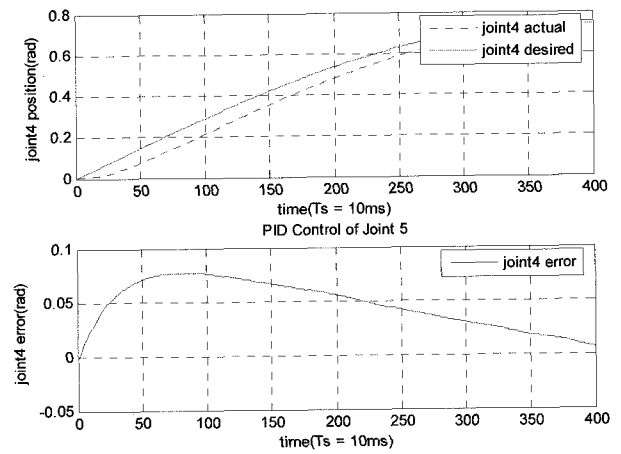


그림 16. 선형 PID 제어기의 조인트 4의 추종 결과.
Fig. 16. Tracking result of joint4 by PID controller.

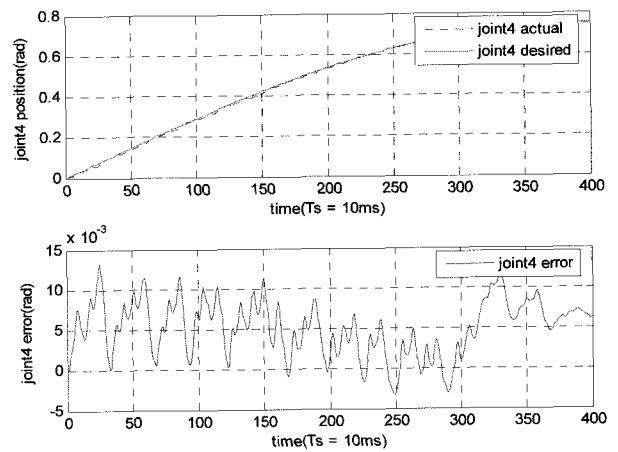


그림 17. 비선형 PID 제어기의 조인트 4의 추종 결과.
Fig. 17. Result of joint4 by nonlinear PID control.

그림 14-19에서 나머지 조인트에 대한 실험 결과를 통해 비선형 PID 제어기의 성능이 마찬가지로 더 좋게 나타남을 알 수 있다.

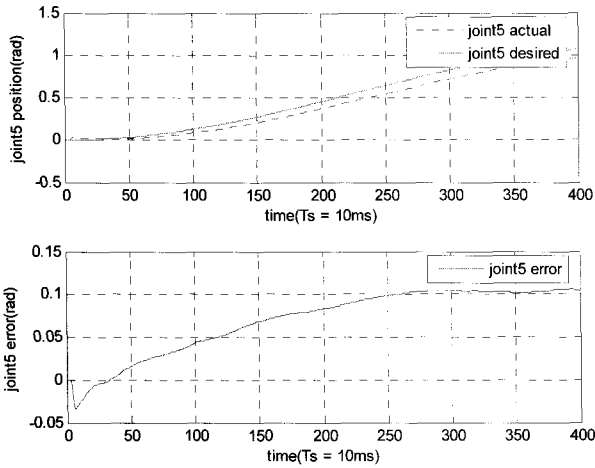


그림 18. 선형 PID 제어기의 조인트 5의 추종 결과.
 Fig. 18. Tracking result of joint5 by PID controller.

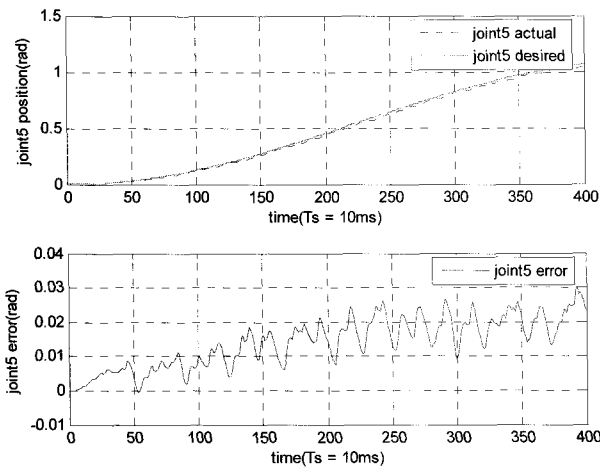


그림 19. 비선형 PID 제어기의 조인트 5의 추종 결과.
 Fig. 19. Result of joint5 by nonlinear PID control.

VI. 결론

본 논문에서는 ROBOKER의 팔의 제어를 위한 비선형 PID 제어기를 하드웨어로 구현하였다. 먼저, 부동 소수점 포맷 기반으로 비선형 함수들을 설계하였으며, 설계된 연산을 통해 비선형 PID 제어기를 설계하였다. 설계된 제어기는 FPGA에 임베드되었다.

설계된 임베디드 제어기의 성능을 검증하기 위해 휴머노이드 로봇 팔의 움직임을 실험하였다. 실험을 통해 비선형 PID 제어기의 동작이 수행됨을 확인했으며 비록 채터링이 있었지만 선형 PID 제어기에 비해서 비선형 PID 제어기의 성능이 더 좋음을 확인하였다.

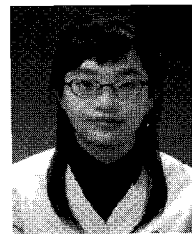
참고문헌

- [1] R. C. Dorf and R. H Bishop, *Modern Control Systems*, Addison Wesley, 1995.
- [2] S. Omatu, M. Khalis, and R. Yusof, *Neuro-control and Its Applications*, Springer, 1995.
- [3] S. Jung and S. S. Kim, "Hardware implementation of a neural network controller with an MCU and an FPGA for nonlinear systems," *International Journal of Control, Automation, and Systems Engineering*, vol. 4, no. 5, pp. 567-574, 2006.
- [4] S. Jung and S. S. Kim, "Hardware implementation of a real-time neural network controller with a DSP and an FPGA for nonlinear systems," *IEEE Transaction on Industrial Electronics*, vol. 54, no. 1, pp. 265-271, 2007.
- [5] X. Shao, D. Sun, and Y. Su, "Development of a nonlinear PID controller with Saturated Function Design," *IEEE International Conference on Information Acquisition*, pp. 468-472, 2005.
- [6] Y. X. Su, B. Y. Duan, and C. H. Zheng, "Nonlinear PID control of a six-DOF parallel manipulator," *IEE Proc. Control Theory Appl.*, pp. 95-102, 2004.
- [7] D. Sun, X. Shao, and Y. Su, "Global stability of a saturated nonlinear PID controller for robotic manipulators," *IROS*, pp. 3032-3037, 2006.



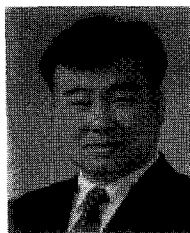
김정섭

1980년 1월 3일생. 2006년 충남대학교 메카트로닉스공학과 졸업. 2007년~현재 충남대학교 대학원 메카트로닉스공학과 지능로봇시스템 석사과정 재학중. 관심 분야는 지능 시스템의 SoC 구현, 영상 처리 및 인식 시스템.



전효원

1984년 1월 8일생. 2006년 충남대학교 메카트로닉스공학과 졸업. 2006년~현재 충남대학교 메카트로닉스공학과 석사과정. 관심분야는 임베디드 제어 시스템 설계, 인간과 로봇의 상호작용을 위한 힘제어 응용공학.



정술

1964년 9월 11일생. 1988년 미국 웨인주립대 전기 및 컴퓨터 공학과 졸업. 1991년 미국 캘리포니아대 데이비스 전기 및 컴퓨터 공학과 석사. 동 대학 박사. 1997년~현재 충남대학교 메카트로닉스공학과 부교수. 관심분야는 지능 제어 및 지능 로봇 시스템, 임베디드 제어기 설계, 로봇과 인간의 상호작용, 무인 로봇의 원격제어.

어 및 지능 로봇 시스템, 임베디드 제어기 설계, 로봇과 인간의 상호작용, 무인 로봇의 원격제어.