

# 힘 제어 기반의 로봇 팔과 인간 팔의 상호 작용을 위한 임베디드 시스템 설계

## Implementation of an Embedded System for an Interaction between Robot Arm and Human Arm Based on Force Control

전 효 원, 정 슬\*

(Hyo Won Jeon and Seul Jung)

**Abstract:** In this paper, an embedded system has been designed for force control application to interact between a robot arm and a human operator. Force induced by the human operator is converted to the desired position information for the robot to follow. For smooth operations, the impedance force control algorithm is utilized to represent interaction between the robot and the human operator by filtering the force. To improve the performance of position control of the robot arm, a velocity term has been obtained and tested by several filters. A PD controller for position control has been implemented on an FPGA as well. Experimental studies are conducted with the ROBOKER to test the functionality of the designed hardware.

**Keywords:** embedded system, interaction, force control, ROBOKER arm

### I 서론

산업용 로봇에서 지능형 로봇으로 그 개발이 확장됨에 따라 휴머노이드 로봇에 대한 연구가 한창 진행 중이다. 휴머노이드 로봇의 팔은 산업용 로봇과 마찬가지로 움직임이 자유롭도록 주로 6축으로 구성되어 있다. 하지만 최근의 휴머노이드 로봇의 경우 대부분 간단한 움직임을 구현하고 있는 실정이다.

따라서 물건을 든다거나, 두 팔로 작업을 한다거나, 사람과 악수를 하는 등 상호 협력 작업은 부분적으로 가능하다. 이러한 상호 협력 작업을 위해서는 위치제어 제어 뿐만 아니라 접촉 힘을 조절하는 힘 제어가 필수적이다. 로봇의 위치제어만으로 협력 작업을 할 수 없기 때문이다. 그만큼 힘 제어는 휴머노이드와 같은 지능형 로봇에서 없어서는 안 될 기술이다.

로봇의 힘제어 기술은 다양한 방식이 제안되었지만 임피던스 방식과 하이브리드 방식으로 크게 나뉜다. 임피던스 방식은 직접 힘을 조절하지 않고 임피던스 변수들에 의해 힘이 조절 되는 반면, 로봇과 대상체와의 동적인 요소가 고려된다[1]. 하이브리드 힘제어 방식은 위치제어와 힘제어를 나누어서 제어하므로 직접 힘을 제어하는 장점이 있지만 동적요소를 고려하지 않는 단점이 있다[2]. 두 방식을 합한 형태의 하이브리드 임피던스 방식도 제안되었다[3,4]. 또한 임피던스 힘제어 방식의 단점을 보완하여 임피던스 힘제어 방식에서 직접 힘을 제어할 수 있는 변형된 제어방식이 제안되었다[5,6].

힘제어 기술과 더불어 휴머노이드 로봇이 사람과 같이 발전하고 있는 현 상황에서 로봇의 이동성은 매우 중요한

부분이다. 이를 위해서는 제어기 또한 규모가 작고 휴대하기 편한 임베디드 시스템을 사용해야 한다. 임베디드 시스템은 DSP나 AVR 같은 마이크로프로세서들로 많이 설계하고 있다. 하지만 기존 제품은 휴머노이드 로봇과 같은 다관절의 시스템에서 사용하기에는 입, 출력 포트의 제한으로 사용에 어려움이 많다. 또한 주변의 제어에 필요한 주변 소자들을 추가하면 제어기의 규모가 점차 커지게 된다. 이러한 문제들을 해결하고 하나의 칩으로 제어를 완벽하게 설계할 수 있는 것이 바로 시스템 온 칩 구현이 가능한 FPGA 칩이다.

이전의 선행연구에서 FPGA에 PID 제어기를 임베디드하여 모터 제어를 구현하였다. 또한 DSP와 연동하여 신경회로망제어기를 구현하였고 모션캡처 장치에서 엔코더 신호를 감지하고 마스터 로봇으로 데이터를 전송하기 위해 FPGA 칩을 사용하였다[7-9].

본 논문에서는 로봇과의 상호작용을 위한 힘제어 알고리즘을 수행하는 임베디드 시스템을 FPGA에 구현한 내용을 정리하였다[10,11]. 사용자의 힘을 로봇에 적용하면 그 힘은 임피던스 필터를 거쳐 위치 정보로 바뀌게 된다. 로봇은 이 위치정보를 추종하게 된다. 실제로 사람이 힘을 가하였을 때 로봇이 따라서 위치 추종을 하는지 확인하는 실험을 통해 이를 검증하였다.

### II. Humanoid Robot

#### 1. ROBOKER

그림 1은 휴머노이드 로봇인 ROBOKER이다. ROBOKER는 인간을 도와 가정이나 공장에서 작업하게 될 미래의 로봇이다. 어깨 3개, 팔꿈치 2개, 손목의 1개로 좌, 우 팔을 각각 6개의 엔코더 일체형 DC 모터로 구동한다. 또한 목 부분의 2개를 포함하여 총 14개의 관절을 가진다. 본 논문에서 사용한 부분은 왼쪽 팔로, 어깨의 두 관절과 팔꿈치

\* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수: 2009. 5. 1., 수정: 2009. 6. 10., 채택확정: 2009. 10. 12.

전효원: LIG 넥스원(atlantia44@naver.com)

정 슬: 충남대학교 메카트로닉스공학과(jungs@cnu.ac.kr)

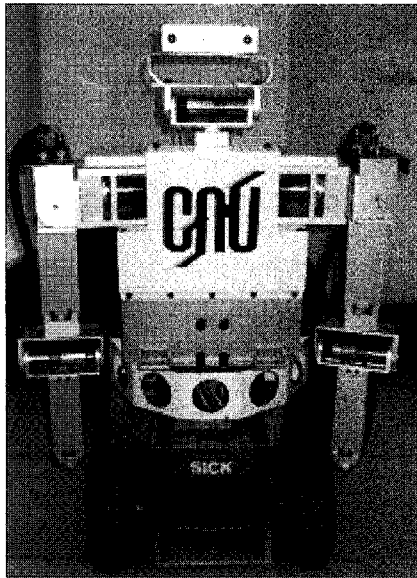


그림 1. 로보커.  
Fig. 1. ROBOKER.

한 관절이다. 총 3자유도의 로봇 팔을 실험 대상으로 삼았다. 로봇 팔의 끝에는 힘센서가 달려 있어 사용자로부터의 힘을 감지한다.

2. 3축 동기구학(Motion Kinematics)

정해진 시간에 로봇이 안전하게 주어진 일을 수행하기 위해서는 직교 공간에서 로봇 팔의 속도 조절이 중요하다. 따라서 위치 정보뿐 아니라 로봇 팔 끝의 속도 또한 필요하다. 이때 이용해야 하는 부분이 동기구학이다. 동기구학을 이용하면 직교 좌표의 속도  $\dot{X}$ 을 실제적으로 제어하는 각 조인트의 각속도  $\dot{q}$ 로 부터 구할 수 있다.

조인트공간의 각도와 직교공간에서의 위치는 순기구학  $L(q)$ 을 통해 수식 (1)과 같은 관계를 가진다.

$$X = L(q) \tag{1}$$

이 관계식을 시간으로 미분하면 직교 공간에서의 속도와 가속도를 각각 구할 수 있다.

$$\dot{X} = J\dot{q} \tag{2}$$

$$\ddot{X} = \dot{J}\dot{q} + J\ddot{q} \tag{3}$$

수식 (3)을 정리하면 직교 공간에서의 가속도로부터 조인트 공간의 가속도 또한 구할 수 있다.

$$\ddot{q} = J^{-1}(\ddot{X} - \dot{J}\dot{q}) \tag{4}$$

위의 식에서 사용한  $J$ 는 자코비안으로 변환행렬  $T$ 의  $p_x, p_y, p_z$ 를 각각 조인트 각도인  $q_1, q_2, q_3$ 로 미분한 결과 값이다. 본 논문에서 사용한 자코비안 값은 아래와 같다.

$$J = \begin{bmatrix} J_{11} & J_{12} & J_{13} \\ J_{21} & J_{22} & J_{23} \\ J_{31} & J_{32} & J_{33} \end{bmatrix} \tag{5}$$

여기서

$$\begin{aligned} J_{11} &= -s\theta_1 c\theta_2 d_3 c\theta_3 - c\theta_1 d_3 s\theta_3 - c\theta_1 d_2 \\ J_{12} &= -c\theta_1 s\theta_2 d_3 c\theta_3 \\ J_{13} &= -c\theta_1 c\theta_2 d_3 s\theta_3 - s\theta_1 d_3 c\theta_3 \\ J_{21} &= -c\theta_1 c\theta_2 d_3 c\theta_3 - s\theta_1 d_3 s\theta_3 - s\theta_1 d_2 \\ J_{22} &= -s\theta_1 s\theta_2 d_3 c\theta_3 \\ J_{23} &= -s\theta_1 c\theta_2 d_3 s\theta_3 + c\theta_1 d_3 c\theta_3 \\ J_{31} &= 0 \\ J_{32} &= -c\theta_2 d_3 c\theta_3 \\ J_{33} &= s\theta_2 d_3 s\theta_3 \end{aligned}$$

실제로 제어에 사용하는  $J^{-1}$ 와  $\dot{J}$ 는 MATLAB을 이용하여 구하였다.

III. 힘제어

수식 (6)은 직교좌표공간에서의 PD 제어의 제어입력이다. 이것을 수식 (4)에 대입하면 조인트 공간에서의 제어입력 (7)을 얻을 수 있다. 수식 (7)은 각 관절에 주어지는 토크로 환산될 수 있다.

$$\ddot{x} = k_p(x_d - x) + k_d(\dot{x}_d - \dot{x}) \tag{6}$$

$$\ddot{q} = J^{-1}k_p(x_d - x) + k_d(\dot{x}_d - \dot{x}) - \dot{J}\dot{q} \tag{7}$$

한 방향으로 힘이 적용된다고 가정하면 대상으로부터의 힘인 힘 센서에서 측정되는 힘은 수식 (8)과 같이 모델링할 수 있다.

$$f_e = m\ddot{x} + b\dot{x} + kx \tag{8}$$

(8)의 수식을 라플라스 변환한 수식 (9)는 수식 (7)의  $x_d$ 와 같으므로 원하는 경로로 주어진다.

$$x_d = \frac{F_e}{ms^2 + bs + k} \tag{9}$$

따라서, 사용자에게 의한 힘은 (9)의 필터를 거쳐 로봇이 움직이는 위치가 된다. 필터 계수값  $m, b, k$ 에 따라 다른 경로가 생성된다.

IV. FPGA 설계

1. 힘제어기

힘 제어기의 제어입력  $u$ 는 수식 (10)을 이용하여 설계하였다. 아래 수식은 직교좌표공간의 가속도를 조인트 공간으

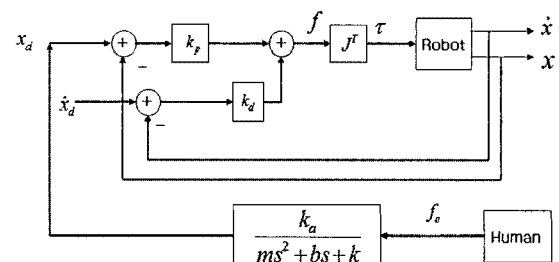


그림 2. 카테시안 공간에서 힘 제어의 블록 다이어그램.  
Fig. 2. Force control block diagram in Cartesian space.

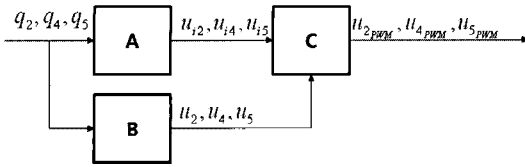


그림 3. 힘 제어기의 CONTROLLER 모듈.

Fig. 3. Force controller module.

로 바꾸어 주는 것을 나타낸다.

$$u \cong \ddot{q} = J^{-1}k_p(x_d - x) + k_d(\dot{x}_d - \dot{x}) - \ddot{J}q \quad (10)$$

- A: 로봇 팔의 초기 상태를 잡아주는 PD 제어기
- B: 초기 값 설정 후 실제적인 제어를 담당하는 힘제어기
- C: A와 B의 상태에 따른 PWM 출력 Mux

로봇 팔의 초기 값 설정을 위해 PD 제어기를 사용하였다. 3개 관절의 제어를 1개의 PD 제어기로 시리얼 제어를 하여 용량을 축소시켰다. 로봇 팔이 초기 위치에 도착하면 힘 제어가 시작된다. 제어는 총 7단계로 구분되며 제어주기 128Hz 동안 모든 계산을 완료하기 위해 1152Hz 마다 한 단계씩 수행하도록 설계하였다. 그림 4에서 각 부분에 대한 설명은 다음과 같다.

A: 부동 소수점을 이용하여  $J^{-1}, J, x, y, z$  값 출력

B: 
$$x_d = \frac{F}{ms^2 + bs + k_e}$$

C: 위치, 각도 값의 속도와 가속도 값을 출력하는 칼만 필터

D: 
$$\ddot{x} = k_p(x_d - x) + k_d(\dot{x}_d - \dot{x})$$

E: 
$$u \cong \ddot{q} = J^{-1}\ddot{X} - \ddot{J}q$$

F: 각 관절의 risk 방지를 위한 Mux

A의 자코비안 부분은 직교좌표영역에서의 제어를 위해 꼭 필요한 부분이다. 오차가 없는 정확한 값이어야 하므로 32bit의 부동소수점을 이용하여 계산하였다. 자코비안 값과 위치 값들은 모두 소수점 이하의 값들이므로 7bit 좌측 쉬프트를 하여 사용하였다.

B는 힘 센서에서 받아오는 데이터를 위치 데이터로 변경하는 역할을 한다. 힘 센서에서 시리얼통신을 통해 얻는 데이터는 16bit이지만 힘의 단위가 더 크기 때문에 8bit로 나눈 값을 사용한다. 본 논문에서 사용한 위치 데이터는 13bit 이다.

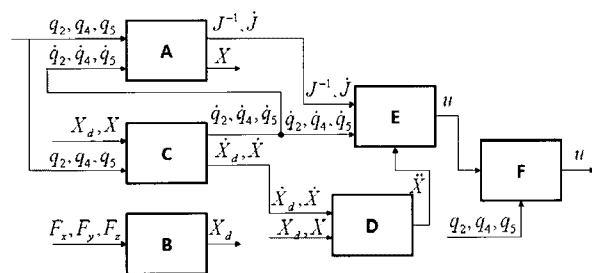


그림 4. 힘 제어기의 제어 모듈.

Fig. 4. Control block module.

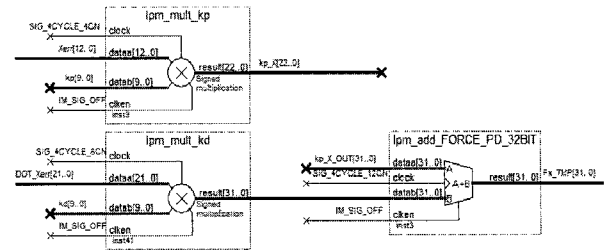
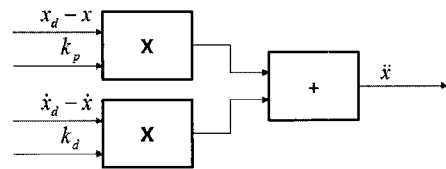


그림 5. 힘 제어기의 PD 연산 설계.

Fig. 5. PD Controller design.

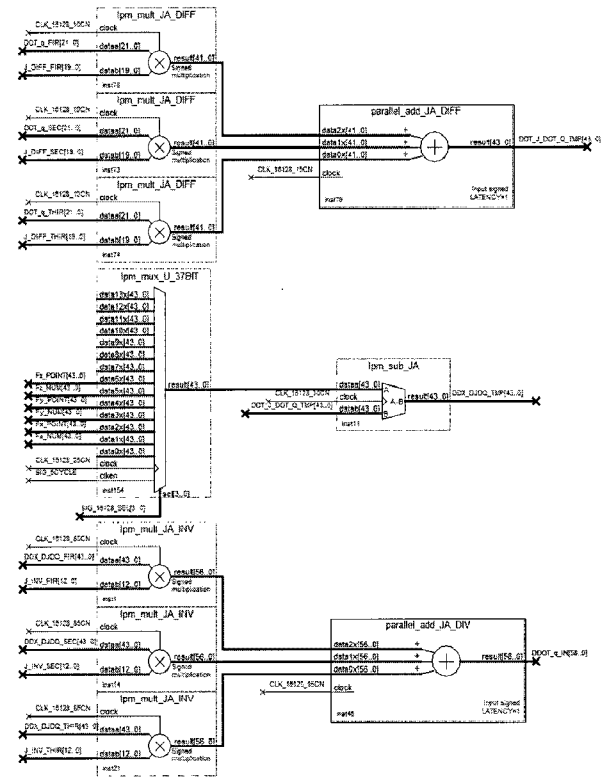
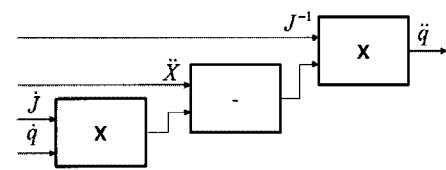


그림 6. 힘 제어기의 제어 신호 설계.

Fig. 6. Control Signal generator design.

C의 칼만 필터는 속도 13개와 가속도 7개의 값을 구하였다. 칼만 필터를 사용하기 위한 주기가 1152Hz 이므로 이 주기를 20으로 나누어 23,040Hz 마다 하나의 데이터를 계산하도록 설계하였다. 20개의 칼만 필터를 병렬로 사용하면 용량이 매우 커지므로 시리얼로 계산하였다.

D는 그림 5의 PD 제어의 역할이다.

그림 4의 E는 제어 입력을 계산하는 부분이다. 동기구속에 의해  $\ddot{q}$ 로부터 실제 제어에서 사용하는 값을 구할 수

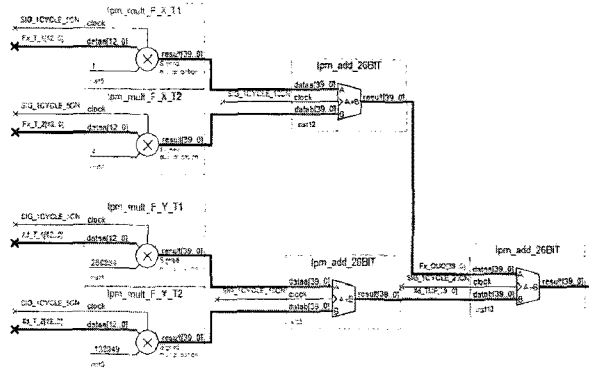
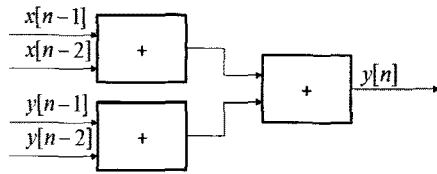


그림 7. 힘 생성 2차 필터 설계.

Fig. 7. 2'order filter design.

있다. 자세한 회로는 그림 6과 같다.

U의 모듈에서 계산하는  $u = \ddot{q} = J^{-1}\ddot{X} - \dot{J}\dot{q}$  부분은 행렬 계산으로 인해 FPGA의 용량을 많이 차지한다. 최적화된 임베디드 시스템 설계를 위해 이 부분의 행렬 계산을 모두 시리얼 연산으로 처리하였다.

그림 7은 2차 필터의 설계 내용이다. 입력 값  $x[n]$ 에는 force data를 실제 힘의 크기와 맞추기 위해 sensor에서 나오는 데이터에  $2^{-3}$ 를 곱하여 사용하였다.

**V. 실험결과**

**1. 실험환경**

본 논문에서 설계한 임베디드 시스템의 검증을 위해 PD 제어기를 이용한 힘 제어에 관한 실험을 수행하였다. X, Y, Z축 중 X축 방향으로 로봇 팔을 잡고 당기고 밀었을 때의 동작 실험이다. 그림 8은 휴머노이드 로봇 팔의 초기화 상태이다. 로봇 팔 앞쪽에 힘 센서가 부착되어 있다.

힘 센서에서 받아지는 데이터는 급격하게 변하기 때문에 32개의 데이터를 평균으로 내는 평균필터를 사용하였다. 실험에서 사용한 값은  $k_p = 64$ ,  $k_d = 2$ ,  $k_o = 2^7$ 이다. 그림 9는 모터 드라이버 회로와 FPGA 제어기를 나타낸다. 모든

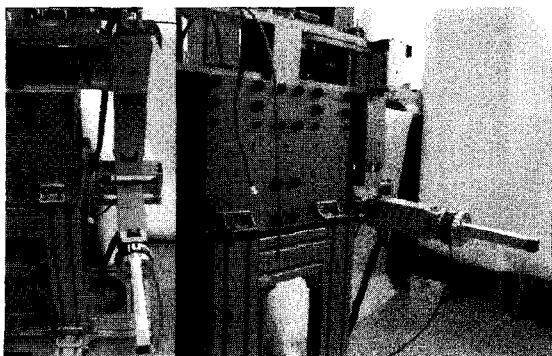
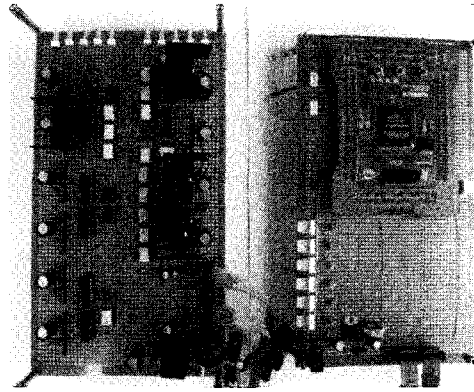


그림 8. 휴머노이드 로봇의 초기화 상태.  
Fig. 8. Initial position of humanoid robot arm.



(a) Motor driver (b) FPGA

그림 9. 제어 하드웨어.

Fig. 9. Control hardware.

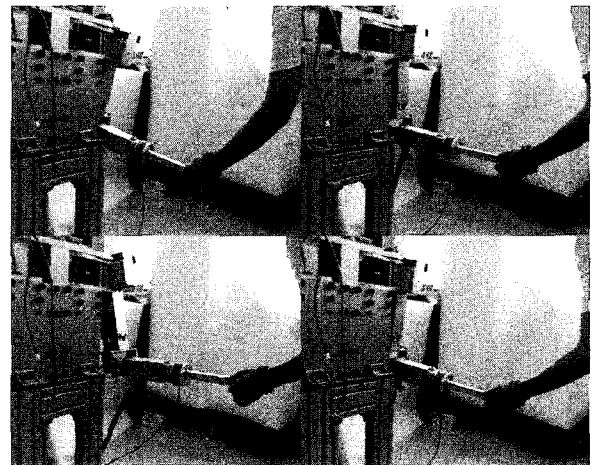


그림 10. 힘 제어 실험 모습.

Fig. 10. Experiment of Interaction.

프로그램은 그림 9의 FPGA에 임베디드 되었다.

**2. 실험 결과**

그림 10은 PD 제어 기반의 실제 힘 제어 실험 모습이다. 사용자가 로봇의 한 쪽 팔을 잡고 움직이는 실험을 하였다. 로봇 팔에 주어지는 힘과 로봇의 움직임을 비교하여 그려 보았다. 샘플링시간은  $\frac{1}{128}$ 로 설정하였다.

Z-Domain의 전달함수는 소수점 이하 6자리이기 때문에 FPGA에서 사용하는 소수점 이하 3자리를 벗어난다. 따라서 이 계수값에  $2^{27}$ 를 곱하여 사용한 후 결과값인  $y[n]$ 에 다시  $2^{27}$ 을 나누어 사용하는 방식으로 필터를 설계하였다. 로봇의 다양한 움직임을 확인하고자 서로 다른 형태의 임피던스 필터를 실험해 보았다. 강성도는 같게 하고 댐핑값을 달리하였다. 샘플링 시간은 0.0078초로 설정하였다.

- 실험 1: 필터 1:  $m=1$ ,  $b=900$ ,  $k_e=100$

이 필터는 실험적으로 구한 값이다. 댐핑이득값이 상대적으로 큰 것을 볼 수 있다. 그림 11에는 주어진 힘으로부터 얻은 목표값과 로봇의 실제 움직임이 같이 나타나 있다. 그림 11의 결과 그래프에서 상위 그래프는 힘센서에서 얻어지는 X축의 목표 값이고 하위의 것은 실제 로봇의 움직임

임 X의 위치를 나타내는 그래프이다. 그림에서 보면 힘센서로부터 얻은 목표값에 진동이 많은 것을 볼 수 있으며, 14초 이후를 보면 실제 추종에서도 원하는 위치에 도달하지 못하는 결과를 확인 할 수 있었다. 로봇 팔 X축의 초기 좌표가 0.205 이므로 같은 크기의 좌표에 표기하기 위해 실제 센서 값에 0.205의 offset값을 주었다. 제어의 후반부로 갈수록 위치 오차가 점점 크게 나타나지만 로봇 팔이 주어지는 힘의 방향대로 동작하는 것을 확인 할 수 있다.

그림 11의 아래 그림에서 7초와 8초 사이에 튀는 부분이 발생하는데 이는 엔코더 데이터의 통신에 의한 잡음으로 볼 수 있다. 또한 시간이 지날수록 오차가 증가하는 것을 볼 수 있는데 이는 로봇이 빠른 응답을 잘 추종하지 못하는 것을 말한다. 상대적으로 큰 댐핑이득값의 영향으로 판단된다.

● 실험 2: 필터 2:  $m=1, b=-900, ke=100$

이 필터를 사용했을 경우 그림 12에서 보여진 것처럼 힘센서로부터의 목표값에 떨림이 많이 줄어든 것을 볼 수

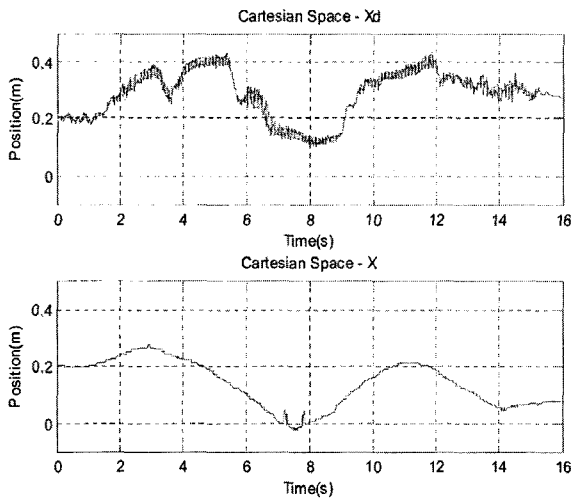


그림 11. 실험 1: 주어진 힘과 로봇의 추종 움직임.  
Fig. 11. Plots of applied force and robot movement with filter 1.

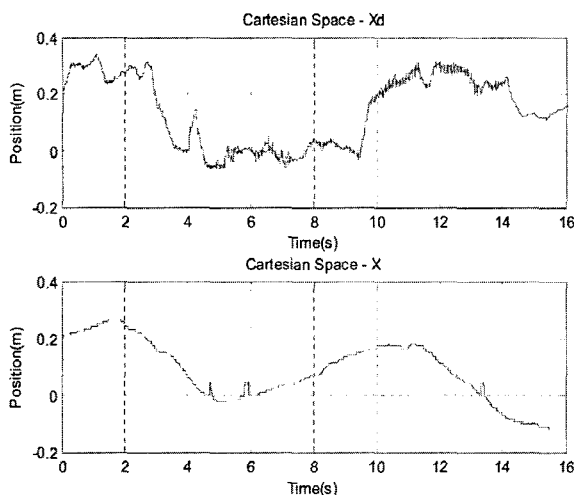


그림 12. 실험 2: 주어진 힘과 로봇의 추종 움직임.  
Fig. 12. Plots of applied force and robot movement with filter 2.

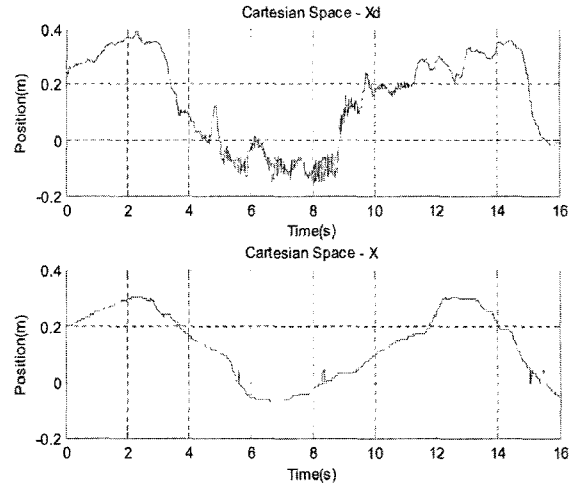


그림 13. 실험 3: 주어진 힘과 로봇의 추종 움직임.  
Fig. 13. Plots of applied force and robot movement with filter 3.

있다. 하지만 마지막 부분의 추종 오차가 크게 발생한 것을 볼 수 있다. 마찬가지로 상대적인 댐핑값의 크기로 판단된다.

● 실험 3: 필터 3:  $m=1, b=1, ke=100$

이번에서는 상대적으로 댐핑값을 줄여 강성도의 역할을 크게 하였다. 그림 13의 추종 결과를 보면 로봇 팔의 움직임이 안정하고 다른 필터들에 비해 원하는 위치를 잘 추종함을 확인할 수 있었다. 목표 위치는 진동이 있지만 실제 로봇의 움직임에서는 진동이 없어진 것을 볼 수 있는데, 이는 로봇의 대역폭이 저역통과 필터 역할을 했기 때문이다.

VI. 결론

본 논문에서는 힘 제어 기반의 로봇 팔과 인간 팔의 상호작용을 위한 임베디드 시스템 설계를 목적으로 제어기를 설계하였다. 이러한 제어기를 검증하기 위해 3축의 로봇 팔 시스템에 적용하여 실험하였다. 다양한 필터의 응답을 확인 해 보면서 로봇과 인간의 상호작용을 살펴볼 수 있었다.

힘 센서에서 측정된 데이터에 계수를 곱하여 위치 정보를 만들어 이 데이터를 로봇의 목표 값으로 주어 위치를 추종 하는 실험을 하였다. 실험의 후반부에서는 정확한 위치 추종을 하지 못하였으나 목표 위치의 방향대로 제어하는 것을 확인 할 수 있었다. 위의 세 번의 실험에서 모두 똑 같은 힘을 적용하는 것이 어려운 것을 알 수 있다.

또한 사람의 임피던스를 고려하지 않고 단지 적용되는 힘을 필터처리하여 나타난 응답의 해석이 어려움이 있었다. 왜냐하면 사람이 느끼는 정도를 정량화하여 표현하기 어렵기 때문이다. 추후과제는 사람팔의 임피던스 변수를 인식하여 그 변수를 토대로 구현하면 움직임이 좋아 질 것으로 판단된다.

참고문헌

[1] M. Raibert and J. J. Craig, "Hybrid position/force control of manipulators," *ASME Journal. of Dynamic Systems, Measurements, and Control*, vol. 102, pp.

- 126-133, 1981.
- [2] N. Hogan, "Impedance control: an approach to manipulator, part i, ii, iii," *ASME Journal of Dynamics Systems, Measurements, and Control*, vol. 3, pp. 1-24, 1985.
- [3] R. Anderson and M. W. Spong, "Hybrid impedance control of robotic manipulators," *IEEE Conference on Robotics and Automations*, pp. 1073-1080, 1987.
- [4] G. J. Liu and A. A. Goldenberg, "Robust hybrid impedance control of robot manipulators," *Proc. IEEE Conference on Robotics and Automations*, pp.287-292, 1991.
- [5] S. Jung and T. C. Hsia, "Adaptive force tracking impedance force control of robot for cutting process," *IEEE Conference on Robotics and Automations*, pp. 1800-1805, 1999.
- [6] S. Jung, T. C. Hsia, and R. G. Bonitz, "Force tracking impedance control for robot manipulators with an unknown environment: Theory, simulation, and experiment," *Journal of Robotics Research*, vol. 29, no. 9, pp. 765-774, 2001.
- [7] S. S. Kim and S. Jung, "Hardware implementation of a neural network controller with an MCU and am FPGA for nonlinear systems," *International Journal of Control, Automation, and Systems Engineering*, vol. 4, no. 5, pp. 567-574, 2006.
- [8] 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. 4, no. 5, pp. 265-271, 2007.
- [9] J. S. Kim, H. W. Jeon, and S. Jung, "ROBOKER 팔의

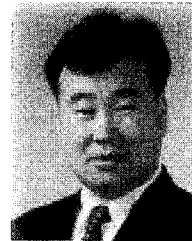
제어를 위한 FPGA 기반 비선형 제어기의 임베디드 하드웨어 구현," *제어·자동화·시스템공학 논문지*, vol. 13, no. 12, pp. 1153-1159, Dec. 2007.

- [10] H. W. Jeon and S. Jung, "Embedded design of position based impedance force control for implementing interaction between a human and a ROBOKER," *ICCAS*, pp. 1946-1950, 2008.
- [11] H. W. Jeon and S. Jung, "Hardware design on an FPGA chip of Impedance force control for interaction between a human and a robot arm," *ASCC*, pp. 1480-1485, 2009.



#### 전효원

1984년 1월 8일생. 2006년 충남대학교 메카트로닉스공학과 졸업. 2008년 충남대학교 메카트로닉스공학과 석사졸업. 현재 LIG 넥스원 연구소 근무. 관심분야는 임베디드 제어 시스템 설계, 인간과 로봇의 상호작용을 위한 힘제어 응용공학.



#### 정슬

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 교수. 관심분야는 지능 제어 및 지능 로봇 시스템, 임베디드 제어기 설계, 로봇과 인간의 상호작용, 무인 로봇의 원격제어.