

Exoskeleton 모션 캡처 장치로 다관절 로봇의 원격제어를 하기 위한 FPGA 임베디드 제어기 설계

Design of Embedded FPGA for Controlling Humanoid Robot Arms Using Exoskeleton Motion Capture System

이운규, 정슬*
(Woon-Kyu Lee and Seul Jung)

Abstract : In this paper, hardware implementation of interface and control between two robots, the master and the slave robot, are designed. The master robot is the motion capturing device that captures motions of the human operator who wears it. The slave robot is the corresponding humanoid robot arms. Captured motions from the master robot are transferred to the slave robot to follow after the master. All hardware designs such as PID controllers, communications between the master robot, encoder counters, and PWM generators are embedded on a single FPGA chip. Experimental studies are conducted to demonstrate the performance of the FPGA controller design.

Keywords : robot manipulator, exoskeleton, ubiquitous, FPGA, motion capture

I. 서론

최근에 로봇기술이 발달함에 따라 다양한 분야에서 로봇의 적용 가능성을 실험하고 연구하고 있다. 특히, 인간과 비슷한 형태의 휴머노이드 로봇의 경우에는 완벽한 보행 알고리즘 및 제어를 선보였고, 가정용 홈 로봇의 경우에는 유비쿼터스 환경과 함께 사용되어 시판을 앞두고 있다. 대부분의 로봇의 경우 로봇의 다양성을 부여하기 위해 많은 하드웨어를 위주로 하고 있으며, 빠른 컴퓨팅 파워를 요구하고 있다.

인간의 움직임을 로봇에게 전달하는 방법 중의 하나가 모션 캡처를 통한 원격제어이다. 원격제어는 인간의 움직임을 캡처하여 그 데이터를 가지고 멀리 떨어져 있는 로봇의 움직임을 제어한다[1-3]. 인터넷 또는 무선으로 원격 제어함으로써 다양한 편리성과 유용성을 얻게 된다. 원거리에 떨어져 있는 환자를 진료 및 수술하는 원격제어는 이미 실행화되고 있다[4-7]. 이러한 원격제어의 개념을 국방로봇 분야에 적용시켜 전투지역에서 인명의 피해를 최소화하기 위해 무인 로봇을 조작하는 연구도 진행되고 있다. 최근에는 인터넷 제어에서 더욱 확장된 새로운 개념으로 유비쿼터스 제어라는 말이 대두되기 시작했다. 어느 곳에서나 접속하여 원거리의 로봇을 움직이는 것이다[8,9].

이처럼 로봇 시스템이 복잡해지고 정교해짐에 따라 그에 따른 디지털 기술도 매우 필요하게 되고 발전하게 되었다. 마이크로 컴퓨팅 기술은 발전 속도가 매우 빨라 대부분의 연산을 처리하기에 충분하다. 하지만 마이크로프로세서는 입출력에 제한이 있고 특정한 작업을 수행하는데 있어 최적화되어 있지 않아 낭비적인 요소가 있기도 한다. 예를 들어, 냉장고의 온도 제어의 경우에 간단한 PID제어기를 사용해서 온

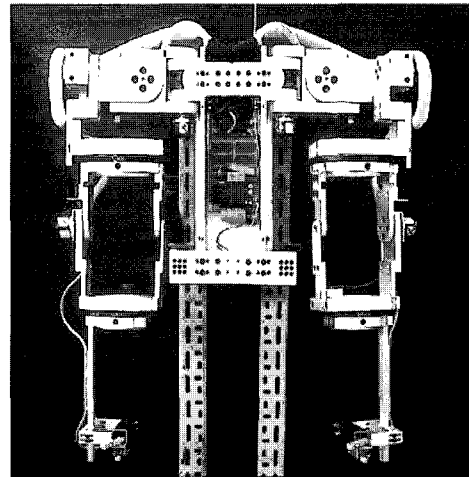


그림 1. Exoskeleton 형태의 마스터 암.

Fig. 1. Exoskeleton typed master arm.

도를 제어하면 되는데, 연산이 빠른 마이크로 프로세서를 사용하는 것은 일종의 컴퓨팅 파워의 낭비가 될 수 있다. 이 경우에 원하는 연산만을 위한 디지털 회로를 구성하여 제어기로 사용하면 가격이나 성능에서 매우 효율적이 된다.

이는 한 시스템이 칩 하나에 설계되는 System-On-Chip (SOC) 개념과 통하며, 이처럼 최적화한 디지털 회로를 구성하는데 FPGA 칩이 많이 사용된다. 이는 복잡한 디지털 회로 대신 FPGA 칩을 하나만 구성할 수도 있으며, 사용자 필요에 따라 특수 기능을 가진 디지털 소자로 설계하여 사용할 수도 있기 때문이다.

본 논문에서는 그림 1에 보여진 엑소스켈레톤 형태의 모션 캡처 장치를 사람이 착용하고 움직이면 원거리에 있는 로봇이 그 동작을 따라 하는 시스템을 구현하였다. 다관절 로봇을 원격으로 제어하기 위한 인터페이스를 임베디드 시스템으로 구현하였으며, FPGA로 제어기를 설계하여 다관절 슬레이브 로봇을 제어하고 시스템에 적용하여 그 성능을 확인했다.

* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수 : 2006. 6. 27., 채택확정 : 2006. 11. 28.

이운규 : 충남대학교 메카트로닉스공학과(seeuspace@hotmail.com)

정 슬 : 충남대학교 BK21 메카트로닉스그룹(jungs@cnu.ac.kr)

※ 본 연구는 학술진흥재단 지역대학우수과학자 지원사업 R05-2003-000-10389-0에 의하여 연구되었음.

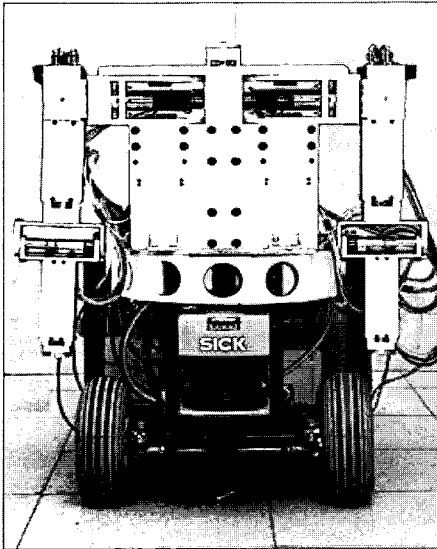


그림 2. 슬레이브 로봇.
Fig. 2. Two arm slave robot.

II. 마스터 및 슬레이브 로봇

1. 전체 구조

그림 1은 본 연구에서 사용한 exoskeleton 형태의 마스터 로봇을 나타내며, 그림 2는 슬레이브 로봇을 보여주고 있다. 그림 1에서 보는 바와 같이 모션 캡처 장치는 한쪽 팔에 6개씩, 총 12개의 자유도를 갖도록 설계하였고 각각의 조인트에는 회전식 엔코더를 장착하여 동작을 검출하도록 하였다. 그리고, 작동자의 이동성을 고려하여 휴대가 가능하도록 하였고 서로 다른 작동자의 체형을 고려하여 어깨의 넓이나 팔의 길이를 작동자의 체형에 맞게 조절할 수 있도록 설계하였다.

그림 2의 로봇도 모션 캡처 장치와 마찬가지로 한쪽 팔에 6개씩, 양쪽 팔에 12개의 자유도를 갖도록 설계 하여 exoskeleton의 움직임을 로봇이 따라 움직일 수 있도록 제작하였다.

III. FPGA 설계

본 시스템은 2개의 FPGA로 이루어져 있다. 여기에 사용되는 FPGA는 Altera사의 APEX20K 계열로 RAM 방식이다.

그림 3은 전체 시스템의 구성을 간략히 보여 준다. 모션 캡처 장치에서 각 관절의 엔코더 값을 읽어 이를 각도값으로 변환하고 전송하는 역할과 로봇의 각 관절값을 모션 캡처 장치로부터 받아 이를 변환한 후 모터의 제어 신호를 생성하는 역할을 2개의 FPGA가 각각 담당하고 있고 두 FPGA는 엔코더 값을 전달해 주기 위 서로 통신을 하고 있음을 볼 수 있다. 원격제어의 경우 로봇과 사용자가 거리를 두고 있는 경우가 많으므로 두 FPGA 간의 통신은 블루투스 무선을 사용했다.

그림 4는 모션 캡처 시스템 측의 FPGA 구조를 대략적으로 보여주고 있다. 모션 캡처 장치 측의 FPGA는 단순히 각 관절의 엔코더 신호를 입력 받아 카운팅한 후 이를 RS232 형태의 시리얼 신호로 변환하는 역할을 수행한다. 이 과정을 통해 16bit의 크기를 가지는 데이터로 구성된 각 관절의 각도 값을 순차적으로 블루투스 모듈로 전송하게 된다. 통신의 신

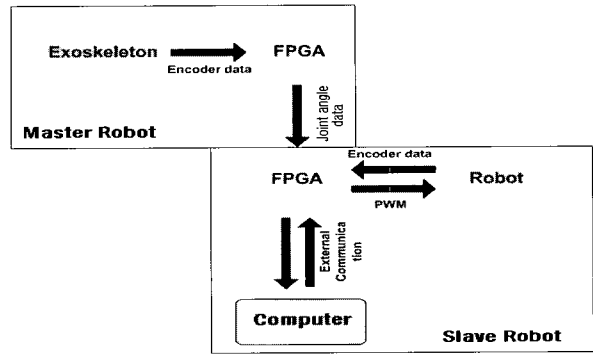


그림 3. 전체 제어 시스템의 구조.
Fig. 3. Overall system block diagram.

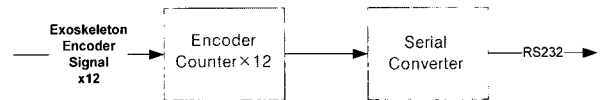


그림 4. 모션 캡처 장치의 FPGA 블록다이어그램.
Fig. 4. Block diagram of motion capture device.

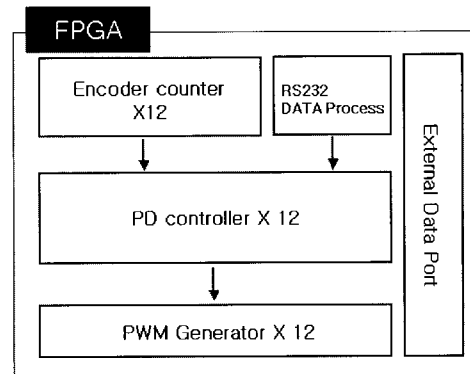


그림 5. 로봇 제어용 FPGA의 설계 구조.
Fig. 5. Overall FPGA design for a robot controller.

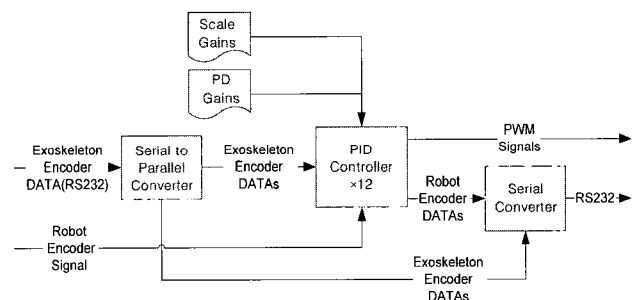


그림 6. 로봇 제어 FPGA 블록다이어그램.
Fig. 6. FPGA block diagram for robot controller.

뢰도를 높이기 위해 각 관절데이터를 모두 전송한 후, 각 관절 데이터를 조합하여 생성한 Check Sum 데이터를 전송한다.

로봇 측 FPGA는 모션 캡처 장치로부터 전송되는 각 관절의 각도 값을 이용해 로봇의 제어 신호를 생성하는 역할을 수행한다. 이를 위해 로봇 제어용 FPGA에는 PID 컨트롤러와 PWM 생성기를 설계하였다. 이 외에도 외부와의 통신을 위

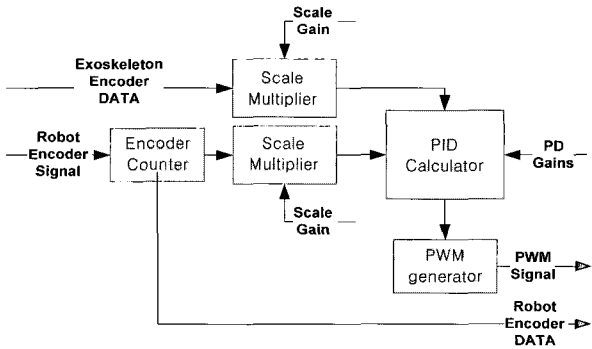


그림 7. PID 제어기의 구조.
Fig. 7. PID controller block diagram.

한 RS232 신호 변환기도 설계하였다. 그림 5의 설계 구조를 상세한 순서도로 나타내면 그림 6과 같다.

그림 6을 보면 12개의 PID제어기를 포함하고 있으며 이는 같은 구조를 가진다. 이 PID 제어기에 사용되는 Gain은 외부에서 상수로 제공된다. PID 제어기의 상세 구조는 그림 7에 보여진다. 그림 7을 보면 스케일 곱셈기가 있는데 이는 모션 캡처 장치의 엔코더와 로봇의 각 관절 엔코더에서 각각 측정된 단위 각도당 엔코더 카운팅 수가 일치하지 않기 때문에 이를 보상해주기 위한 역할을 한다.

그림 8은 PID 제어기를 프로그램으로 설계한 구체적인 모습을 보여준다. 하나의 PID 제어기는 5개의 곱셈기와 4개의 덧셈기를 포함하고 있다. 본 논문에서 FPGA 프로그래밍 소프트웨어로 Altera사의 Quartus II를 사용하는데, 기본적으로 제공하는 곱셈기를 사용할 경우, 곱셈 연산에만 상당한 양의

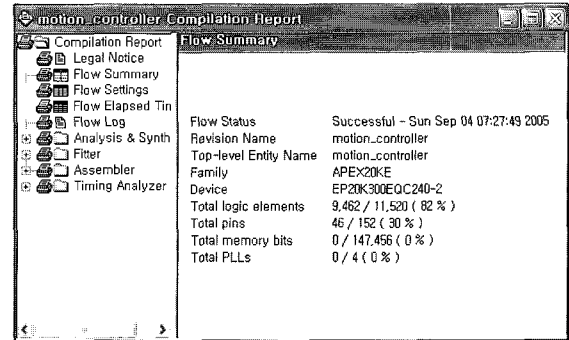


그림 9. Compilation 결과.
Fig. 9. Compilation result.

FPGA 로직 수를 사용하게 된다. 수치적으로 봤을 때 16bit 곱셈기 하나당 약 400 셀을 사용하게 된다. 이 곱셈기에서 사용되는 로직 수의 양을 줄이기 위해 시리얼 곱셈기를 사용했다. 시리얼 곱셈기는 시리얼 형태로 각 bit별로 곱셈을 수행하기 때문에 연산을 수행하기 위해 필요한 로직 수의 양을 상당량 줄일 수 있다. 시리얼 곱셈기를 사용할 경우 16bit 곱셈기 하나당 약 80 셀을 사용하게 된다. 즉, 곱셈에 사용되는 셀의 양이 1/5로 줄어들게 된다.

로봇 제어를 위한 전체 FPGA 프로그램에는 총 60개의 16bit 곱셈기를 사용한다. 그러므로, 시리얼 곱셈기를 사용할 경우에 사용되는 전체 로직 수로 비교하면 상당량의 로직 수를 줄이게 된다. 일반적인 곱셈기를 사용하면 FPGA의 용량인 11,520개의 로직 수를 초과하게 된다. 하지만, 시리얼 곱셈기를 사용함으로써 많은 수의 곱셈이 실행 가능하게 된다.

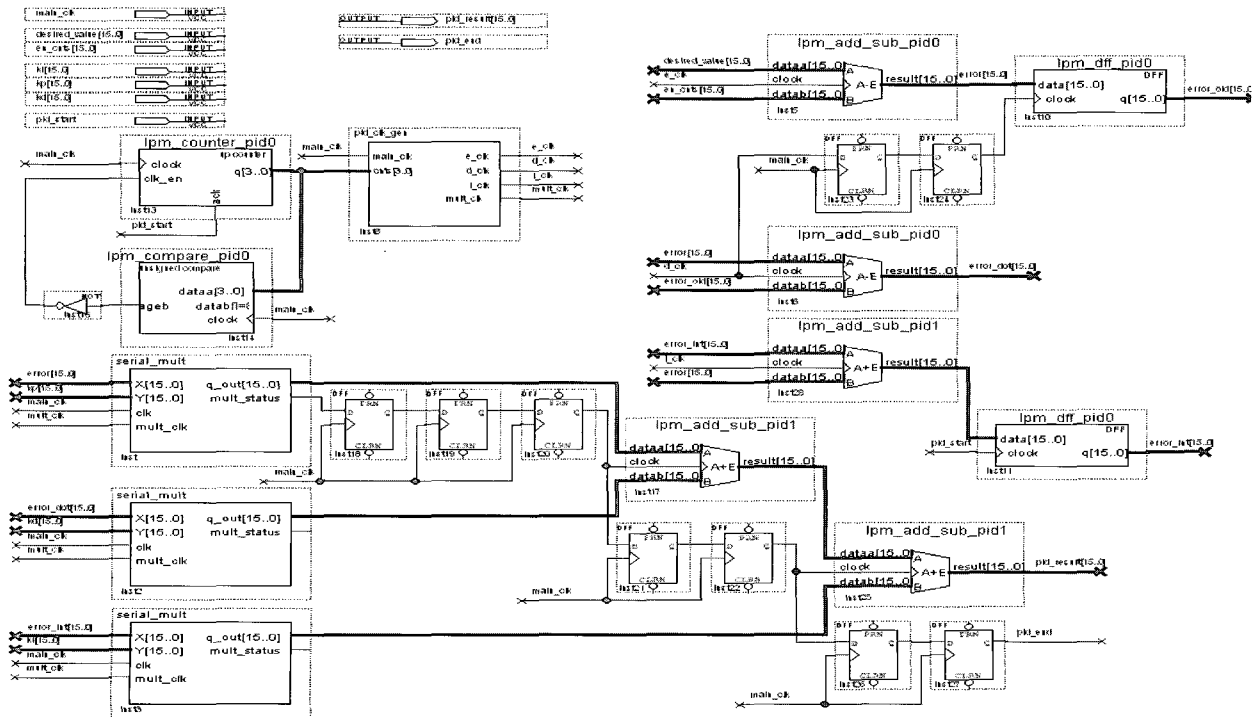


그림 8. PID 제어기의 설계.
Fig. 8. Schematic design of PID controller.

그림 9는 프로그래밍 완료 후 컴파일한 결과이다.

그림 9를 보면 시리얼 콤포트를 사용하였음에도 불구하고 82%의 용량인 9,462개의 로직 수를 사용하였음을 볼 수 있다.

시리얼 콤포트는 로직 수가 적게 소요되지만, 그만큼 연산 시간도 늘어나게 된다. 기본적인 콤포트의 경우 데이터의 크기에 상관없이 콤포트를 하기 위한 데이터가 입력되고 약 2 clock 시간 이후에 결과가 출력되지만, 시리얼 콤포트는 16bit 콤포트의 경우 약 18 clock 시간 이후에 결과가 출력된다.

이는 복잡한 연산을 하는 경우 많은 연산시간을 소요하기 때문에 단점이 되지만, 본 연구에서와 같이 병렬로 구성된 제어기에서 간단한 몇 개의 연산을 병렬로 수행하기 때문에 전체 연산시간이 샘플링 시간보다 짧아 문제가 되지 않았다. 이 시스템의 샘플링 시간은 약 20ms 정도이다. 이 샘플링 시간은 제어 연산 시간이 기준이 된 것이 아니다. 모션 캡처 장치에서 측정된 모든 관절의 데이터를 로봇으로 전송하는데 소요되는 시간이 약 20ms 정도되어 이 시간을 전체 시스템의 샘플링 시간으로 설정했다.

로봇의 제어와 모션 캡처 장치에 사용된 FPGA는 같은 형태의 신호처리 장치와 제어기가 병렬로 구성되어 있다. 이는 관절의 추가가 용이하도록 하기 위해서이다. 즉, 모션 캡처 장치와 로봇의 FPGA를 함께 구성하면 햅틱 디바이스의 범용 제어기로 사용이 가능하도록 설계한 것이다. 또한, 로봇 제어용 FPGA만 사용할 경우 로봇의 범용 보조 또는 주 제어장치로도 사용이 가능하다.

IV. 실험결과

시스템에서 사용된 각 관절의 PID 게인 값은 표 1과 같다.

실험 환경은 그림 10과 같다. 그림 10과 같이 사람이 엑스스켈레톤 모션 캡처 장치를 착용하고 임의의 동작을 한 후, 각 관절의 각도를 확인하였다. 단, 로봇과 모션 캡처 장치의 끝 단 관절인 6번과 12번 관절은 다른 장치가 부착되지 않았고 로봇의 팔 끝 좌표에 영향을 미치지 않으므로 측정에서 제외했다. 그림 11은 실제로 로봇을 움직이는 모습을 나타낸다. 사용자가 마스터 로봇을 움직임에 따라 슬레이브 로봇이 움직이는 것을 볼 수 있다.

표 1. PID 제어기 gain 값 설정.

Table 1. PID controller gains.

Joint No.	P Gains	D Gains	I Gains
1	8	1	1
2	15	1	1
3	30	3	1
4	33	3	1
5	25	2	1
6	25	2	1
7	8	1	1
8	15	1	1
9	30	3	1
10	33	3	1
11	25	2	1
12	25	2	1

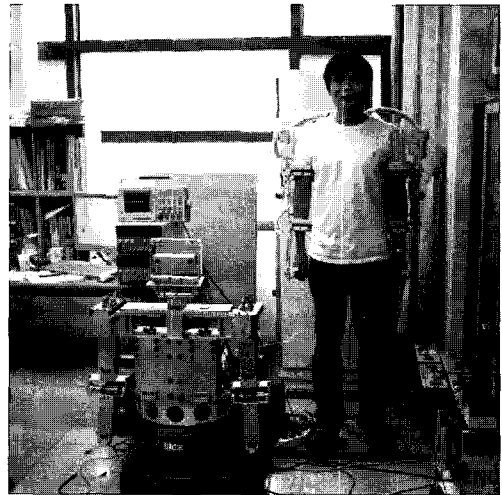


그림 10. 실험 환경.

Fig. 10. Experimental setup.

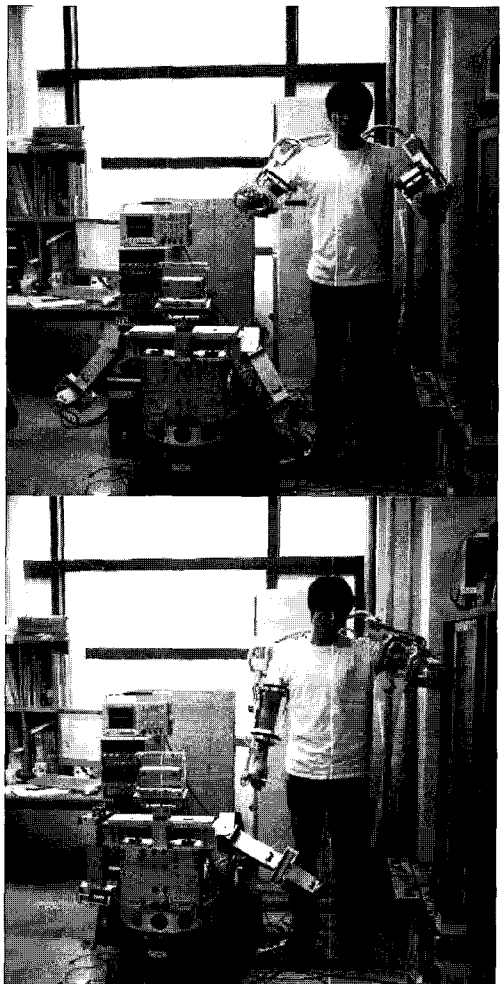


그림 11. 실험 결과.

Fig. 11. Experimental result.

총 실험 시간은 약 1000초이며 각 관절의 값은 각도값으로 출력된다. 출력 결과는 그림 12와 같다. Joint 1~Joint 6은 오른쪽 팔의 결과이며, Joint 7~Joint 12는 왼쪽 팔의 결과이다. 각 관절이 큰 오차 없이 원하는 값을 추종함을 확인할 수 있다.

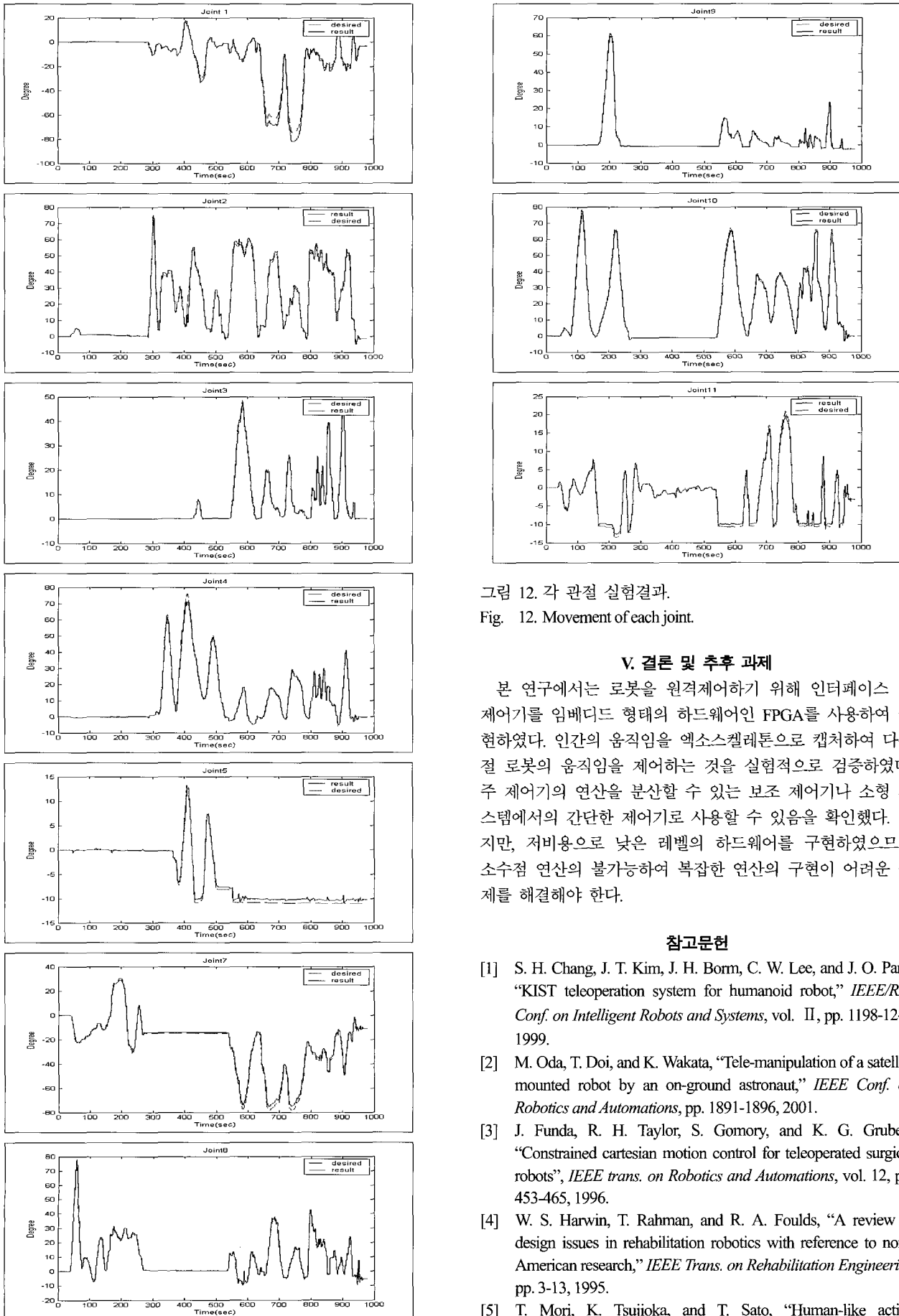


그림 12. 각 관절 실험결과.
 Fig. 12. Movement of each joint.

V. 결론 및 추후 과제

본 연구에서는 로봇을 원격제어하기 위해 인터페이스 및 제어기를 임베디드 형태의 하드웨어인 FPGA를 사용하여 구현하였다. 인간의 움직임을 엑스스켈레톤으로 캡처하여 다관절 로봇의 움직임을 제어하는 것을 실험적으로 검증하였다. 주 제어기의 연산을 분산할 수 있는 보조 제어기나 소형 시스템에서의 간단한 제어기로 사용할 수 있음을 확인했다. 하지만, 저비용으로 낮은 레벨의 하드웨어를 구현하였으므로 소수점 연산의 불가능하여 복잡한 연산의 구현이 어려운 문제를 해결해야 한다.

참고문헌

- [1] S. H. Chang, J. T. Kim, J. H. Borm, C. W. Lee, and J. O. Park, "KIST teleoperation system for humanoid robot," *IEEE/RSJ Conf. on Intelligent Robots and Systems*, vol. II, pp. 1198-12-3, 1999.
- [2] M. Oda, T. Doi, and K. Wakata, "Tele-manipulation of a satellite mounted robot by an on-ground astronaut," *IEEE Conf. on Robotics and Automations*, pp. 1891-1896, 2001.
- [3] J. Funda, R. H. Taylor, S. Gomory, and K. G. Gruben, "Constrained cartesian motion control for teleoperated surgical robots", *IEEE trans. on Robotics and Automations*, vol. 12, pp. 453-465, 1996.
- [4] W. S. Harwin, T. Rahman, and R. A. Foulds, "A review of design issues in rehabilitation robotics with reference to north American research," *IEEE Trans. on Rehabilitation Engineering* pp. 3-13, 1995.
- [5] T. Mori, K. Tsujioka, and T. Sato, "Human-like action

recognition system on whole body motion-captured file," *IEEE Conf. on International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 2066-2073, 2001.

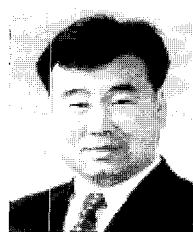
- [6] T. Emura, M. Kumagai, and R. Nomura, "Development of motion capture system using rotating magnetic field and differential magnetic field" *SICE 2001. Proceedings of the 40th SICE Annual Conference. International Session Papers*, pp. 204-209, 2001.
- [7] T. Mori, K. Tsujioka, and T. Sato, "Human-like action recognition system on whole body motion-captured file" *IEEE Conf. on International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 2066-2073, 2001.

- [8] K. B. Lee and D. S. Kwon, "Wearable master device using optical fiber curvature sensors for the disabled" *IEEE Conf. on International Conference on Robotics and Automation*, pp. 892-896, Seoul, Korea, 2001.
- [9] S. Jung, P. W. Jeon, and H. T. Cho, "Interface between robot and human: Application to boxing robot" *International Federation of Automatic Control*, 2002.
- [10] P. W. Jeon and S. Jung, "Teleoperated control of mobile robot using exoskeleton type motion capturing device through wireless communication," *IEEE/ASME Advanced Intelligent Mechatronics*, pp. 1107-1112, 2003.
- [11] K. S. Fu, R. C. Gonzalez, and C. S. G. Lee, *ROBOTICS : Control, Sensing, Vision, and Intelligence*, McGraw-Hill, 1987.



이 윤 규

1978년 2월 25일생. 2003년 충남대학교 메카트로닉스공학과 졸업. 2006년 충남대학교 메카트로닉스공학과 석사 졸업. 현재 도담시스템연구원. 관심분야는 임베디드 시스템 설계, 무인 차량 로봇 제어.



정 슬

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, 로봇과 인간, 무인 로봇의 원격제어.