

논문 2011-48SC-1-6

# 높이 조절 및 하체 분리형 실내용 서비스 이동 로봇의 제작 및 제어

(Implementation and Control of an Extendable and Separable Mobile  
Robot Manipulator For Indoor Service)

안 재 국\*, 정 슬\*\*

(Jae Kook Ahn and Seul Jung)

## 요 약

본 논문은 실내에서 사용할 이동로봇의 구현과 제어에 대한 것이다. 로봇은 두 팔을 가지고 이동할 수 있는 베이스로 구성된다. 로봇은 디자인에 있어 몇 가지 특징을 가진다. 첫 번째, 로봇의 허리는 높낮이 조절이 가능하다. 두 번째로 로봇은 4점 접촉인 이동로봇 모드에서 2 점 접촉인 밸런싱 모드로 전환이 가능하다. 마지막으로 로봇은 상체와 하체의 분리 기능을 갖는다. 이동 베이스 부분은 청소작업에 사용이 가능하다.

## Abstract

This paper presents the implementation and control of a mobile manipulator robot for indoor service. The robot has two arms for tasks and a mobile base for mobility. The robot is designed to have several characteristics. Firstly, the robot has the capability of changing the height of the robot. Secondly, the robot can be changed into a balancing mode of two contact points from mobile mode of four contact points. The robot has a balancing mode like an inverted pendulum robot as well as mobile robot mode. Lastly, as a novel concept, the robot is designed to have the capability of separating into two systems, the robot arm and the mobile robot as well. The mobile base can be separately used for a cleaning service.

**Keywords :** robot manipulator, mobile robot, mobile manipulator

## I. 서 론

최근에는 서비스 로봇의 발달로 이동로봇의 이동기능뿐만 아니라 작업 기능도 요구되고 있다. 이동로봇에 대한 연구는 크게 위치인식, 경로계획, 그리고 제어로

나눌 수 있다. 그 중에서 가장 많은 부분을 차지하는 것이 자기 위치와 주변 환경 인식이다. 이러한 연구 결과는 단지 이동하는 것에 만족하지 않고 작업을 수행하는 것에 사용된다.

이동로봇이 작업을 수행한다면 다양한 작업이 있을 수 있지만, 가장 중요한 작업은 팔로 하는 작업일 것이다. 따라서 이동로봇에 로봇 팔을 달아 작업을 할 수 있는 서비스 로봇에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다<sup>[1~8]</sup>. 팔 달린 이동로봇의 기구학 해석<sup>[1]</sup>과 동역학 해석, 설계<sup>[2]</sup> 그리고 제어<sup>[3~5]</sup>에 대한 연구가 진행되었다. 신경회로망을 사용한 제어 방식에 연구도 진행되고 있다<sup>[6~7]</sup>.

팔 달린 이동로봇의 경우에 하나의 몸통에 1개 또는

\* 회생회원, \*\* 정회원-책임저자, 충남대학교 메카트로닉스공학과

(Department of Mechatronics Engineering, Chungnam National University)

※ 본 논문의 일부는 전자공학 하계학술대회에서 발표되었음. 이 논문은 교육과학기술부 특정기초사업(R01-2008-000-10992-0)과 지식경제부 융복합형 로봇 전문인력양성사업(AIM)의 지원으로 연구되었으며, 이에 감사를 드립니다.

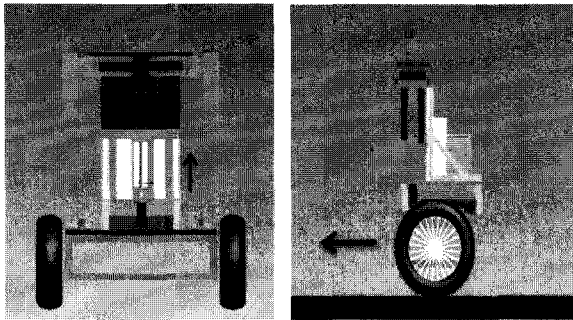
접수일자: 2010년7월20일, 수정완료일: 2010년12월13일

2개의 팔이 장착된 형태가 대부분이다. 산업용 로봇팔을 소형화하여 몸통에 부착한 형태의 양팔로봇에 대한 연구가 진행되고 있다<sup>[8]</sup>. 일본에서는 한팔 당 가반하중이 20 kg인 양팔로봇과 10kg인 양팔 로봇이 개발되었으며, 독일의 DLR의 경우에는 한팔 당 가반하중이 15kg인 양팔 로봇을 개발한 바 있으며, 결과적인 로봇의 크기가 커지는 것이 사실이다.

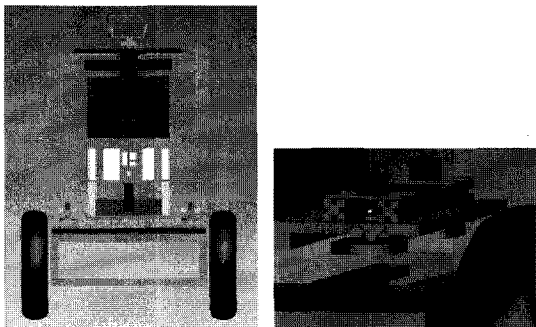
최근에 일본에서 개발한 트윈디-윈은 섬세하고 물건을 집을 올릴 수 있는 네 개의 손가락을 가지고 있으며 전 방향이동이 가능한 바퀴를 장착하여 인간의 다양한 활동을 보조해 주는 용도로 고안되었다<sup>[9]</sup>.

최근 KIST에서는 보행로봇기반의 서비스 로봇이 가정에서 음식을 날라주는 작업을 수행하였다. 영상처리를 통한 물체의 인식에서부터 두 팔의 조작 그리고 로봇의 보행까지 홈 로봇의 역할을 보여주었다. 이처럼 이동성은 물론이고 두 팔에 대한 역할이 매우 중요하게 대두되고 있다.

본 논문에서는 두 팔이 달린 이동로봇을 설계 제작하였다. 머리 부분에 스테레오 카메라가 달려 있고, 각각 6자유도를 가진 두 개의 팔이 몸통에 달려 있는 전체 시스템을 구현하였다.



(a) 높이 조절 (b) 밸런싱



(c) 분리기능 (d) 연결부분

그림 1. 모바일 매니플레이터의 개념도  
Fig. 1. Concept of mobile manipulator.

본 로봇 설계의 특징은 그림 1 (a)에 보여진 것처럼 첫째 높이 조절이 가능한 허리이다. 허리 부분이 상하로 움직이도록 설계되어 눈높이를 맞출 수 있는 작업에 효율성을 추가하였다. 둘째로 앞뒤의 보조 바퀴는 위로 움직일 수 있어 밸런싱 모드로 전환을 가능하게 하였다. 그림 1 (b)에서 밸런싱 모드로의 전환은 좁은 공간에서 회전이 용이한 장점이 있다.

마지막 설계의 특징은 그림 1의 (c)처럼 바퀴가 달린 마지막으로 베이스의 이동부분이 상체 부분과 분리 및 합체가 가능하도록 설계하였다. 그림 1(d) 부분은 상체와 하체의 연결부분으로 자동적으로 구성된 것을 나타낸다. 하지만 현재는 그림 6에 보여진 것처럼 수동적으로 고정된다. 베이스 이동부분이 독립적으로 움직일 수 있으므로 집안 청소와 같은 작업이 가능하도록 제작하였다.

II. 로봇 시스템 구조

1. 로봇 전체 구조

로봇은 이동로봇 모드와 밸런싱 모드로 전환할 수 있다. 로봇은 2바퀴 기반의 이동로봇으로 보조바퀴를 이용한 4접점 구동과 역진자 기반의 밸런싱 구동으로 나눌 수 있다. 두 가지 모드를 용도에 따라 적절하게 이용함으로써 효율적인 운용이 가능하다.

휴머노이드 상체 로봇은 한 팔 6관절 씩 12관절의 구조로 구동되며, 머리 부분에 2개의 관절이 있다. 그리고 머리 부분에는 비주얼 서보잉을 위한 스테레오 카메라가 장착되어 있어서 비전 기반의 시스템을 이룰 수 있도록 하였다. 이 로봇의 각 관절의 위치는 최대한 인간

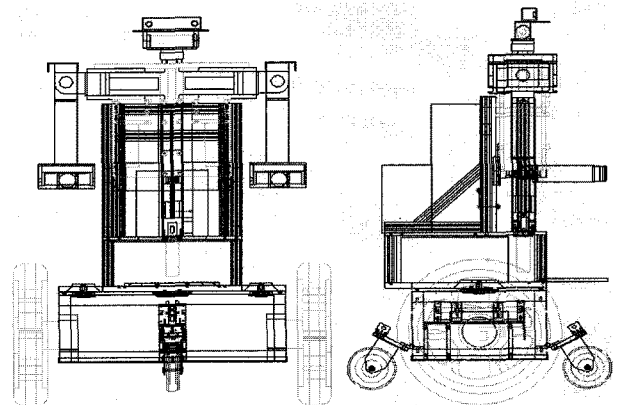


그림 2. 모바일 매니플레이터의 설계  
Fig. 2. Design of mobile manipulator.

과 유사한 형태로 구성되어 있다. 한 팔을 기준으로 어께는 3개의 관절로 구동되며, 팔꿈치 2개의 관절, 팔 끝에 1개의 관절로 구동된다<sup>[10]</sup>.

이동로봇과 휴머노이드 로봇의 결합은 허리구조를 이용하여 결합하게 된다. 허리구조는 작업 공간 확보를 위한 리프팅 구조와 이동로봇과 휴머노이드 로봇의 분리를 위한 탈부착 구조로 이루어져 있다.

그림 2에서 보여진 것처럼 허리 부분의 리프팅 구조를 통하여 인간과 유사한 작업공간을 확보할 수 있으며, 탈부착 구조를 이용하여 하단의 이동로봇만을 이용해 독립적인 구동이 가능하도록 하였다. 이것은 가정용 서비스 로봇으로의 개발을 위한 것으로 청소 등과 같이 독립적으로 작업할 수 있도록 하였다.

### 2. 모바일 매니플레이터 기구학

모바일 매니플레이터는 이동로봇과 매니플레이터가 결합된 형태이다. 작업을 위한 매니플레이터와 매니플레이터의 이동성을 확보하도록 하는 이동로봇이 결합된 것이다. 이동로봇은 두 바퀴의 속도  $w_R, w_L$ 을 이용하여  $\dot{x}_m, \dot{y}_m, \dot{\phi}_m$ 을 얻을 수 있다. 이것은 그림 3에서 볼 수 있듯이 X-Y평면상의 점  $P(a, b)$ 과 회전각  $\phi$ 으로 표현된다.

이것은 Z축으로  $\phi$ 만큼 회전 변환하여 X축으로 a만큼, Y축으로 b만큼 평행 이동한 것과 같다.

$$R_{z,\phi} = \begin{bmatrix} \cos\phi & -\sin\phi & 0 \\ \sin\phi & \cos\phi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} x' &= x+a \\ y' &= y+b \end{aligned} \quad (2)$$

매니플레이터의 각 링크의 위치와 회전상태를 확인할 수 있다.

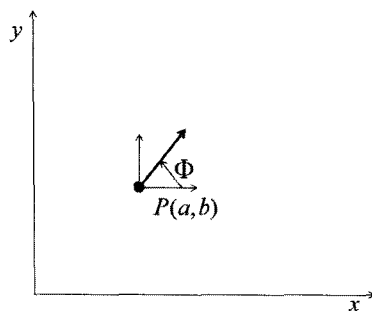


그림 3. X-Y평면  
Fig. 3. X-Y Plane.

$${}^0T_6 = \begin{bmatrix} n_x & s_x & a_x & p_x \\ n_y & s_y & a_y & p_y \\ n_z & s_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

매니플레이터의 기구학은 식 (1) 식 (2)에서 설명한 변환행렬이 더해진 것과 같은 형태이다. 그림 4에 나타난 것처럼 로봇의 X-Y평면상에서 Z축으로 회전한 것에 대한 각 링크의 위치 변환행렬  ${}^0T'_i$ 는 식 (4)와 같이 표현되며, 각 점  $P(x', y')$ 은 식 (5)과 같이 표현된다.

$${}^0T'_i = R_{z,\phi} {}^0T_i \quad (4)$$

$$P(x', y') = P(x+a, y+b) \quad (5)$$

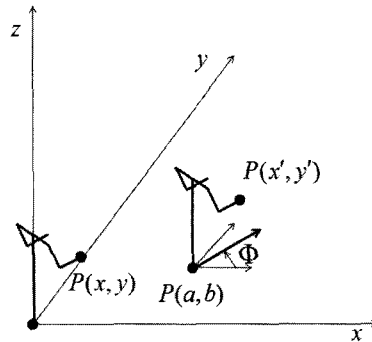
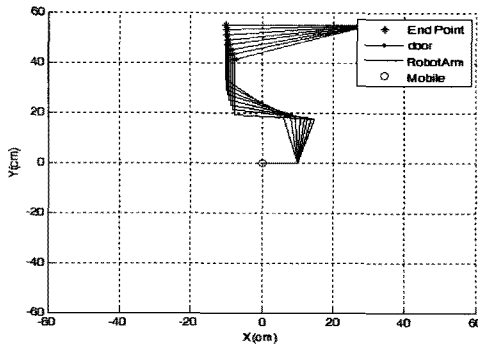


그림 4. 모바일 매니플레이터의 좌표계  
Fig. 4. Coordinate of mobile manipulator.

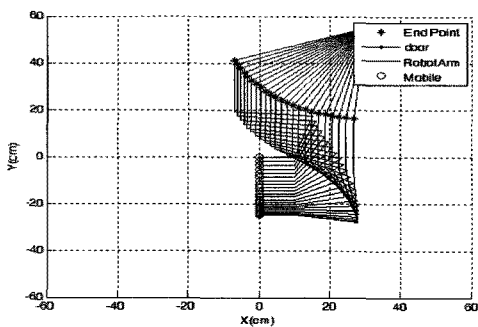
### 3. 기구학 시뮬레이션

로봇의 팔 작업 공간 안에서는 팔을 이용한 제어를 하게 되고, 작업 공간을 벗어나게 되면, 모바일의 움직임으로 제어를 하게 된다. 로봇의 작업 공간을 고려하여 일정 구간은 팔을 이용하고, 작업 공간을 벗어나게 되면 이동 로봇과 팔이 함께 작업을 수행하게 된다.

그림 5는 매니플레이터와 모바일 로봇이 함께 작용하여 원 경로를 추종하도록 한 것이다. 그림 5 (a)는 Y축 방향을 고려한 로봇 팔의 작업 공간을 확인한 것이다. 매니플레이터는 앞에서 소개한 역기구학을 이용했을 때, Y축 상에서 약 40cm에서 55cm의 작업 공간을 가진다. 따라서 Y축 방향으로 40cm구간까지 매니플레이터만을 이용하여 경로를 생성하게 하였다. Y축 방향의 작업공간을 벗어나게 되면 모바일과 팔이 경로를 생성하게 된다. 그림 5 (b)에서 볼 수 있듯이 40cm 이하의 경로를 만들기 위하여 매니플레이터와 이동로봇이 함께 움직이게 된다.



(a) 로봇팔 만 움직이는 경우



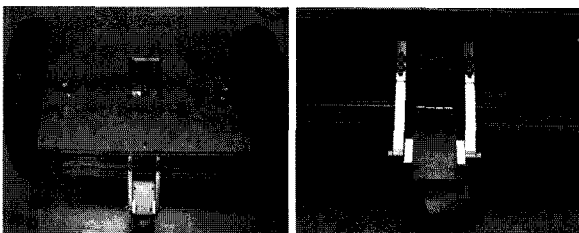
(b) 이동로봇이 움직이는 경우

그림 5. 모바일 매니퓰레이터 작업 경로 생성  
Fig. 5. Movement of mobile manipulator.

### III. 로봇 시스템

#### 1. 이동로봇 베이스

이동로봇 베이스가 그림 6 (a)에 나타나 있다. 상체와 탈부착이 가능하고 바퀴의 지름은 0.4m이며, DC 모터로 구동된다. 이동 로봇의 구동은 역진자 형태와 보조 바퀴를 이용한 모바일 형태로 구현되었다. 역진자 형태는 이동성이 뛰어나고, 4접점의 모바일 형태는 안정적으로 작업을 할 수 있는 장점이 있다. 2접점 역진자 형태와 4접점 상태를 필요에 따라 변환할 수 있도록 보조



(a) 이동로봇

(b) 보조바퀴

그림 6. 이동로봇 베이스  
Fig. 6. Robot base.

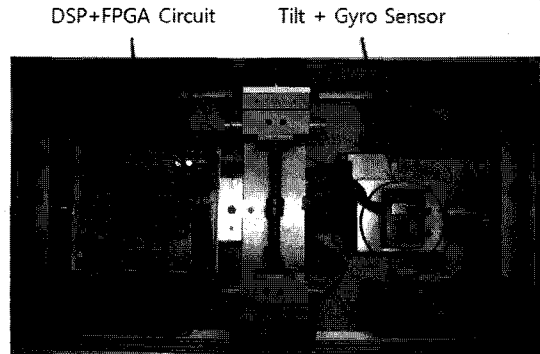


그림 7. 이동로봇 제어부

Fig. 7. Control hardware of mobile robot base.

바퀴를 사용하였다. 그림 6 (b)는 이동로봇의 보조바퀴이다. 타이밍 벨트와 볼 스크류를 이용하여 구동하게 된다. 리미트 스위치를 이용하여 보조바퀴의 상태를 결정하게 된다.

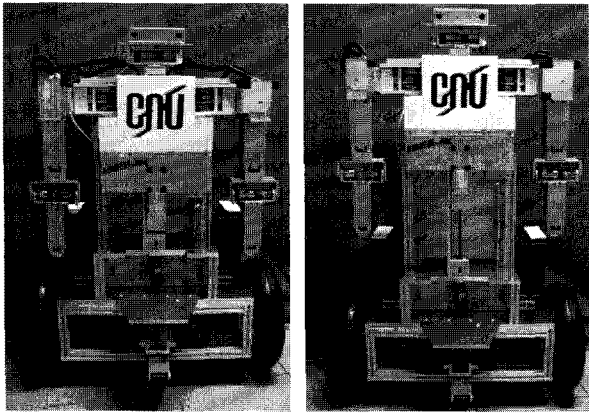
그림 7은 이동로봇의 제어부이다. 밸런싱 시스템을 구현을 위하여 Tilt센서와 Gyro센서를 이용하여 각도를 생성하여 이를 제어에 이용하였다. Tilt센서는 각도를 위한 센서로 고주파 영역에서는 취약한 면을 가지고 있으며, Gyro센서는 각속도 센서로 적분과정에서 누적오차가 발생할 수 있다. 이를 보상하기 위한 방법으로 Complementary 센서 융합 이론을 이용하였다<sup>[11]</sup>.

구동을 위한 바퀴뿐만 아니라, 보조바퀴 구동, 탈착서보 모터 구동을 위해서는 DSP2812가 제공하는 입출력 핀으로는 한계가 있으므로 FPGA를 이용하여 확장이 용이하도록 하였다.

#### 2. 상체 로봇

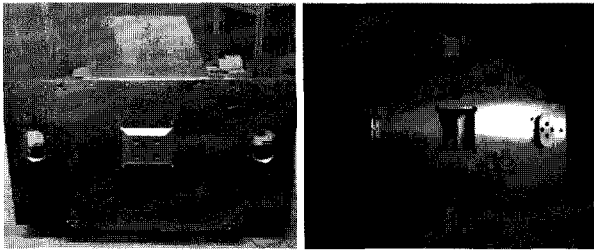
휴머노이드 상체 로봇은 그림 8과 같은 형태로 이루어져 있다. 인간과 유사한 형태의 팔을 가지고 있으며, 각각의 관절은 회전관절로 DC모터로 구동된다. 한 팔 당 6개의 관절로 이루어져 있으며, 모두 12개의 모터로 매니퓰레이터를 구동하게 된다. 각 관절은 회전조인트 형태로 구성되어 있어서 직접적인 결합이 가능하다. 독립된 시스템으로 구현하기 위하여 PC, 회로부, 전원부 모두 로봇에 탑재된 형태로 이루어져 있다. DSP-FPGA 회로와 모터 드라이버는 박스 안에 자리 잡고 있으며, 로봇의 밑 부분에는 PC가 내장되어 있다.

그림 9는 강체와 하체의 연결부분을 나타낸다. 그림 10은 합체된 전체 시스템이다. 로봇은 모바일 로봇과 휴머노이드 로봇이 결합된 형태의 로봇으로 이동성을 갖춘 서비스로봇의 개발을 목적으로 하고 있다. SICK



(a) 높이를 낮추었을 때 (b) 높이를 올렸을 때

그림 8. 높이 조절 가능한 허리구조  
Fig. 8. Height controllable waist structure.



(a) 상체 (b) 하체

그림 9. 분리 가능 허리 구조  
Fig. 9. Separable structure.

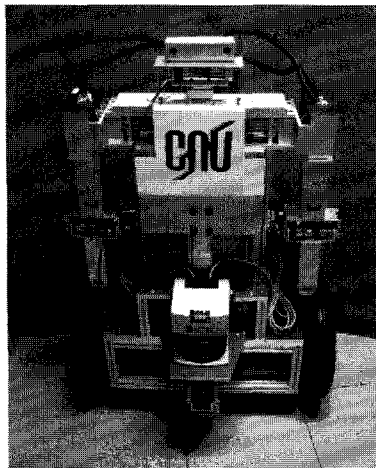


그림 10. 전체시스템 모습  
Fig. 10. Overall system.

사의 LMS200 레이저 센서, PGR의 Bumblebee 스테레오 비전 카메라 등 다양한 센서를 이용한 이동 및 확장이 가능하도록 설계되었다.

### 3. 제어부

로봇 시스템의 전체적인 경로 생성과 신경망 구현은

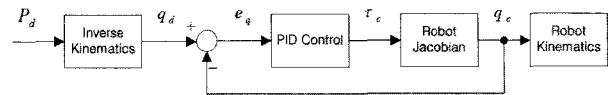


그림 11. 로봇 팔 제어 블록다이어그램  
Fig. 11. Robot arm control block diagram.

PC에서 담당하였다. 양팔 로봇의 경로 생성을 위한 역기구학 연산과 센서값에 따른 이동로봇의 위치에 대한 정보를 각 모듈에 전달하게 된다. On-chip 회로를 설계하여 휴머노이드 로봇과 모바일 로봇에 각각 적용하였다. 제어부의 주된 역할은 PC에서 전달된 정보에 따라 휴머노이드 로봇의 관절과 이동로봇을 제어하는 것이다.

그림 11에는 로봇팔 제어 블록다이어그램이 나타나 있다. 직교좌표공간에서 기준 위치  $P_d$ 는 역기구학을 통해 조인트의 기준 경로  $q_d$ 로 바뀌게 되고 조인트 추종 오차  $e_q$ 를 PID제어기가 줄이도록 토크  $\tau_c$ 를 생성한다.

이동로봇 제어의 경우 오른쪽과 왼쪽 바퀴 구동을 위한 토크를 각각 생성하기 위해 PID제어기가 각각 사용된다. 그림 12에서 직교 좌표 공간에서의 기준 위치  $x_d, y_d, \phi_d$ 는 역기구학을 통해 조인트 기준위치  $r_d, l_d$ 로 바뀌게 되며, 실제 조인트값  $r, l$ 과 비교하여 오차를 생성하고 PID제어기를 사용하여 오차를 줄이도록 토크를 생성한다.

그림 13은 전체 시스템 제어 블록다이어그램을 보여

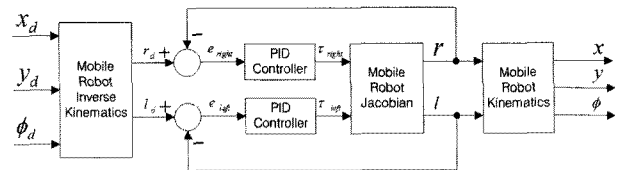


그림 12. 이동로봇의 위치 제어  
Fig. 12. Position control block diagram of mobile robot.

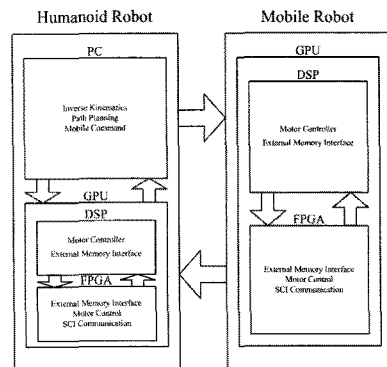


그림 13. 제어부 시스템 블록다이어그램  
Fig. 13. Control hardware block diagram.

준다. 모터의 PID 제어는 DSP에서 수행하고, 각종 센서 데이터 값들의 획득 및 데이터 통신 처리 등 실제 제어 연산 이외의 부분은 FPGA에서 수행하도록 구성되어 있다. DSP는 제어 알고리즘 연산만을 담당하고, 센서 데이터 처리 및 데이터 통신 관련 기능은 FPGA에서 담당하도록 구성하여 제어의 효율을 높이기 위해 노력하였다.

PC와의 통신은 시리얼통신을 이용하였으며, DSP와 FPGA간의 데이터 교환은 DSP에서 사용하는 외부 메모리 인터페이스 기능을 이용하였다. 100Hz의 주기로 데이터 값의 업데이트와 제어 연산이 이루어진다.

4. 제어 GUI

그림 14는 시스템 제어를 위한 전체 GUI이다. MS사의 Visual Studio를 사용하였으며, 각 모듈별로 기능을 정리하였다. 모듈은 크게 4부분으로 나뉘어져 있다. 힘 센서 정보, 영상 정보, 로봇 정보, 모바일 제어 등으로 이루어져 있으며, 전체적인 연산은 OnTimer와 스레드(thread)기반의 multimedia timer를 이용하여 구현하였다.

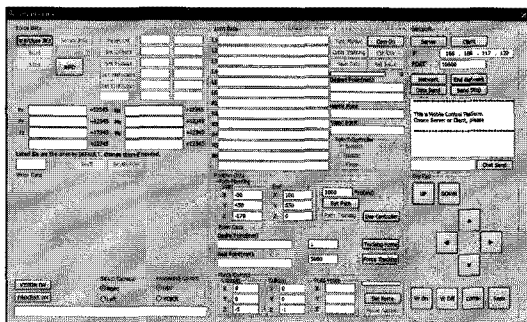


그림 14. MFC 제어 GUI  
Fig. 14. MFC Control GUI.

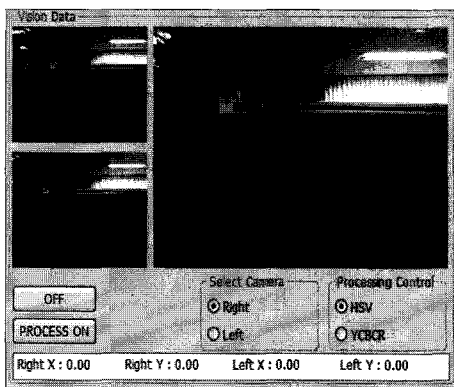
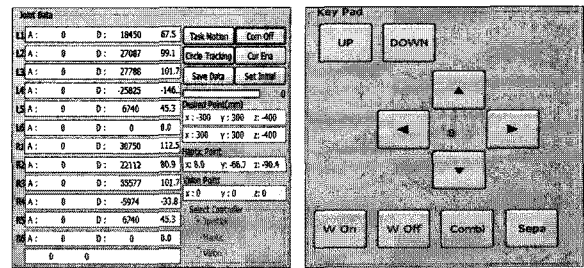


그림 15. 카메라 영상  
Fig. 15. Vision GUI.



(a) 관절 데이터 모니터링 (b) 키패드제어

그림 16. 모니터링 GUI  
Fig. 16. Monitoring GUI.

그림 15는 스테레오 비전 카메라의 정보를 받아들이는 부분이다. 오른쪽(R)과 왼쪽(L) 카메라의 영상과 그 정보를 확인할 수 있다. 1394타입의 카메라로서, 30프레임으로 영상을 전송하게 된다. PGR(Point Gray Research)사에서 제공하는 라이브러리를 사용하여 카메라의 영상정보를 받을 수 있다.

그림 16 (a)는 휴머노이드 로봇의 각 관절값과 목표 위치를 확인할 수 있다. 12개의 관절에 대한 정보를 확인할 수 있으며, 조이스틱과 햅틱 디바이스로부터의 목표 위치를 확인할 수 있다. 또한, 로봇의 상태를 제어하는 부분으로서, 목적에 따른 역기구학의 사용과 경로 추종, 데이터 저장 등의 역할을 수행한다. 그림 16 (b)는 키패드를 이용하여 모바일의 위치제어를 할 수 있도록 한 것이다. 모바일 로봇의 제어를 위해 만들어졌다. 보조바퀴의 구동, 전진, 후진, 회전 등의 명령을 수행할 수 있다.

5. FPGA를 이용한 데이터 처리 블록 설계

로봇 시스템은 총 12개의 엔코더와 모터를 구동하는 데이터를 처리해야 한다. 하지만, DSP에서 제공하는 QEP 모듈이 2개밖에 없고, DSP가 순차 처리 방식이기

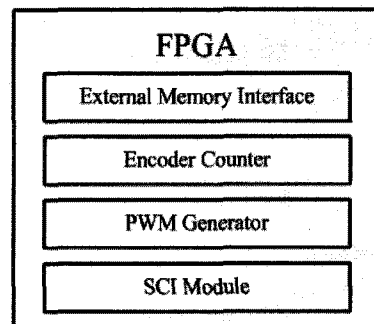


그림 17. FPGA 모듈  
Fig. 17. FPGA module.

때문에 엔코더 데이터의 동시 처리가 불가능하다는 문제로 인해, 이 기능을 FPGA에서 구현하였다. FPGA상에서 구현된 엔코더 카운트 모듈을 나타낸 것으로, 포토커플러 IC를 통해 들어온 엔코더 펄스 신호를 D플립플롭을 이용하여 소프트웨어적으로 엔코더 노이즈를 제거한 후, 12개의 엔코더 펄스를 각각 32비트로 카운트하도록 구성하였다.

PC와는 SCI통신을 이용하여 데이터를 전송하고, DSP와는 외부메모리 인터페이스 방법을 이용하여 데이터를 전송한다. 모터 제어를 위한 PWM(Pulse Width Modulation)의 경우 50KHz의 주기를 가진 PWM을 이용하였다.

① 외부 메모리 인터페이스 : DSP2812는 외부 메모리를 사용하기 위한 방법으로 사용하고자 하는 칩을 선택하는 chip select 핀과 메모리에 저장된 값을 쓰고 읽기 위한 read, write핀을 이용한다. 12개의 Address 라인과 16개의 Data 버스를 사용하여 저장된 변수에 접근하게 된다. 이를 이용하여 FPGA에서 구현하게 되면, nCS2\_0와 nRE 또는 nWE 핀의 상태에 따라 읽을 것인지 혹은 쓸 것인지를 판단하여 Address 라인에서 지정하는 Data값을 불러오거나 저장하게 된다.

② 엔코더 카운터 : 일반적인 엔코더의 A, B상을 읽어 두 상의 상태에 따라 정회전, 역회전을 판단 회전한 양을 측정하게 된다.

③ PWM 발생기 : 50MHz의 메인 주기에서 모터에서 요구하는 50kHz의 PWM을 만들어 내면 1000의 분해능을 가지게 된다. DSP에서 계산된 PID제어 값을 이용하여 모터의 Dir, Break, PWM 신호를 만들게 된다.

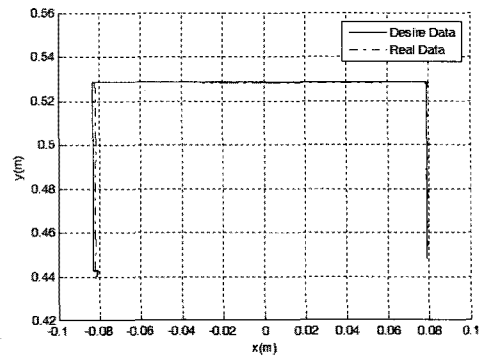
④ 시리얼 통신 모듈 : 10ms 주기로 통신하기 위하여 500000 Pulse마다 통신을 시작하도록 하였다. 휴머노이드 로봇의 경우 12개의 관절 값을 전송해야 하므로 약 52 Byte를 전송하도록 구성되어 있다.

#### IV. 실험

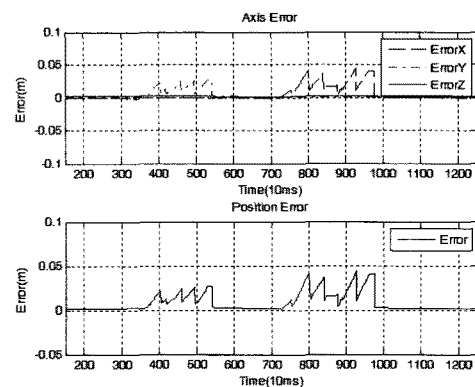
##### 1. 직선 경로 추종

햅틱 모듈을 통해 생성되는 x-y-z의 3축 좌표를 이용하여 로봇 팔의 경로를 생성하고 이를 추종하는 양상을 PID제어를 하였으며, 제어 주기는 100Hz이다.

움직이지 않는 구간에서의 위치 오차는 거의 발생하지 않지만, 움직이는 과정에서의 오차가 크게 발생함을 알 수 있다. 움직이는 과정에서 발생하는 오차의 양상



(a) 경로추종



(b) 추종 오차

그림 18. PID 제어 양상과 오차(라인 추종)

Fig. 18. PID control results(line).

으로 PID 제어기의 성능을 확인하도록 하였다. 그림 18에 직선 경로 추종 결과가 나타나 있다.

##### 2. 이동실험

다음은 이동 로봇을 이용한 위치 추종에 대한 실험이다. 원격으로 경로를 설정하고 로봇이 추종하도록 하였다. 그림 19에 나타난 것처럼 로봇이 기준 경로를 잘 추종하고 있음을 확인할 수 있다.

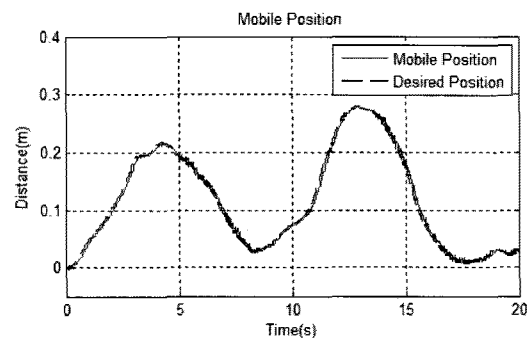


그림 19. 이동로봇의 위치 추종 결과

Fig. 19. Position control result of mobile robot.

V. 결 론

본 논문에서는 높이 조절 및 분리가능한 모바일 매니플레이터를 설계, 제작 및 제어하였다. 각 로봇의 구동부를 이루는 DC모터 모듈을 구동하기 위한 DSP와 FPGA를 이용하여 모터 제어부를 설계하여 적용하였다. 카메라나 힘 센서 같은 PC기반의 센서를 사용하기 위하여 MFC기반의 프로그래밍을 하였으며, PC를 직접 로봇에 거치시킴으로써, 이동로봇 부분의 독립적인 구동이 가능하도록 하였다. 이를 위해서는 추후과제로 상체 부분을 거치 할 수 있고 충전할 수 있는 스테이션이 필요하게 된다.

참 고 문 헌

[1] C. Ding, P. Duan, M. Zhang, H. Liu, "The Kinematics analysis of a redundant mobile manipulator", IEEE Conference on Automations and Logistics, pp. 2352-2357, 2008.

[2] Y. Chen, L. Liu, M. Zhang, and H. Rong, "Study on coordinated control and hardware system of a mobile manipulator", World Congress. on Intelligent control and Automation, pp. 9037-9041, 2006.

[3] Z. Li, S. S. Ge, and Z. Wang, "Robust adaptive control of coordinated multiple mobile manipulators", IEEE Conf. on Control Applications, pp.71-76, 2007.

[4] Y. Wu and Y. Hu, "Output tracking control of mobile manipulator via dynamical sliding mode control", IEEE Conf. on Mechatronics and Automation, pp. 2160-2164, 2005.

[5] G. D. White, R. M. Bhatt, C. P. Tang, and V. N. Krovi, "Experimental evaluation of dynamic redundancy resolution in a non-holonomic wheeled mobile manipulator", IEEE/ASME Trans. on Mechatronics, vol. 14, no. 3, pp. 349-357, 2009.

[6] D. Xu, D. Zhao, J. Yi, and X. Tan, "Trajectory tracking control of omnidirectional wheeled mobile manipulators: robust neural network-based sliding mode approach", IEEE Trans. on Systems, man, and Cybernetics, Vol. 39, No. 3, pp. 788-799, 2009.

[7] X. Tan, D. Zhao, J. Yi, Z. G. Hou, and D. Xu, "Unified model and robust neural network control of omnidirectional mobile manipulators", IEEE Conf.. on Cognitive Informatics, pp. 411-418, 2007.

[8] 박찬훈, 박경택, "산업용 양팔로봇의 설계 및 제어", 한국정밀공학회지 제 25권 11호 pp. 58-65, 2008.

[9] H. Iwata, and S. Sugano, "Design of Human Symbiotic Robot TWENDY-ONE", IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 580-586, 2009.

[10] D. H. Song, W. K. Lee, and S. Jung, "Analysis of Kinematic Mapping Between an Exoskeleton Master Robot and a Human Like Slave Robot With Two Arms", ICCAS, pp. 2154-2159, 2005.

[11] H. J. Lee, and S. Jung, "Control of a Mobile Inverted Pendulum Robot System", International Conference on Control, Automation and Systems, pp. 217-222, 2008.

저 자 소 개



안 재 국(학생회원)  
 2008년 충남대학교 메카트로닉스 공학과 졸업.  
 2010년 충남대학교 메카트로닉스 공학과 지능로봇 시스템 전공 석사졸업. 현재 LG 디스플레이사 연구원

<주관심분야 : 자동화 시스템, 모바일 매니플레이터의 제어 및 응용, 밸런싱 로봇 시스템 설계 및 제어, 지능 제어 시스템>



정 슬(정회원)  
 1988년 미국 웨인 주립대 전기 및 컴퓨터 공학과 졸업  
 1991년 미국 캘리포니아 데이비스 대학 전기 및 컴퓨터 공학과 석사,  
 1996년 미국 캘리포니아 데이비스 대학 전기 및 컴퓨터공학과 박사.

1997년~현재 충남대학교 메카트로닉스공학과 교수.

<주관심분야 : 지능 시스템 제어기 설계 및 지능 로봇, 밸런싱 메커니즘 구현 및 응용>