

논문 2012-50-3-23

바닥작업이 가능한 양팔 서비스 로봇의 기구학 설계, 제작 및 제어

(Design, Implementation, and Control of Two Arms of a Service Robot
for Floor Tasks)

배 영 겐*, 정 슬*

(Yeong Geol Bae and Seul Jung)

요 약

본 논문에서는 바닥작업용 서비스 로봇을 위한 두 팔 매니퓰레이터의 개발 및 제어에 관한 연구를 기술하였다. 6자유도의 매니퓰레이터를 설계하였으며, 그 중 5자유도 매니퓰레이터를 제작하였다. 제작된 매니퓰레이터의 순기구학과 역기구학을 해석하고 시뮬레이션을 수행하여 기구학을 검증하였다. 실제로 역기구학을 바탕으로 로봇 팔을 제작하여 제어하였다. 양팔의 동작 성능을 확인하기 위해 오른쪽 팔과 왼쪽 팔을 각각 따로 제어하여 서로 다른 경로를 추종하는 실험을 수행하였다. 실험결과를 통해 기구학 분석을 검증하였으며, 시스템의 동작 여부를 확인할 수 있었다.

Abstract

This paper presents the implementation and control of two arms of an indoor service robot for floor tasks. The robot arms are designed to have 6 degrees-of-freedom (DOF), but actually built to have 5 DOF. Forward and inverse kinematics of two arms are analyzed and simulated to confirm the kinematic analysis. Two arms are actually controlled based on the inverse kinematics. The right and left arms are separately controlled to follow different trajectories in order to make sure the functionality of both arms. Experimental studies are conducted to confirm the kinematic analysis and proper operation of two arms.

Keywords: two arm manipulators, service robot, kinematics, control

I. 서 론

매니퓰레이터 기술은 산업용 로봇에서 매우 중요한 기술로 주목되어 왔다. 최근에 산업로봇에서 서비스 로봇으로 이동하는 로봇 패러다임을 보면 서비스 로봇에 대한 관심과 연구가 주를 이루고 있다^[1~4]. 서비스 로봇은 단순한 이동로봇 형태가 대부분이었으나, 최근에는

매니퓰레이션 기능이 추가된 형태의 서비스 로봇에 대한 연구가 활발해지고 있다^[1~4].

특히 가사지원을 위한 서비스 로봇의 형태로 모바일 매니퓰레이터에 대한 활발한 연구가 진행되고 있다^[1~4]. 대표적으로 와세다 대학의 Twendy-one과 같은 가정용 서비스 로봇에 대한 연구들이 발표되고 있다^[5]. 또한 좁은 공간에서의 효율적인 움직임을 위해서 두 바퀴로 구동하는 이동로봇에 로봇 팔을 부착한 형태의 로봇들도 연구되고 있다^[10~11].

가정에서의 서비스는 매니퓰레이션 기능이 절대적으로 요구되며, 그 적용 범위가 매우 넓다. 대부분의 가정용 서비스 로봇의 경우에는 식탁이나 싱크대 등과 같이 일정한 높이에서의 작업을 고려하고 있다^[5]. 하지만 수*

* 정회원, 충남대학교 메카트로닉스공학과
(Department of Mechatronics Engineering,
Chungnam National University)

※ 본 논문은 지식경제부의 융복합형 로봇전문인력 양성사업(NIPA-2012-H1502-12-1002)지원으로 연구되었으며, 이에 감사를 드립니다.

접수일자:2012년11월20일, 수정완료일:2013년2월18일

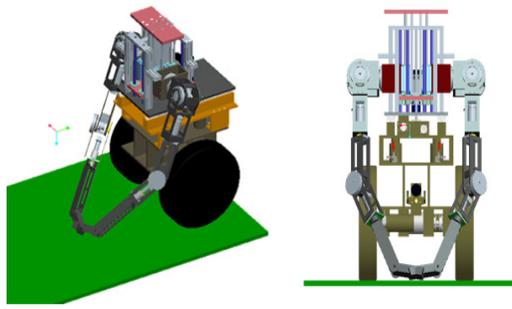


그림 1. 바닥 작업을 위한 서비스 로봇 구조
Fig. 1. Home service robot for floor tasks.

납장과 같은 높은 위치에 대한 작업이 필요할 수도 있으며, 우리나라의 생활이 바닥(Floor)에서 이루어지고 있는 점을 고려하면 한국형 서비스로봇의 경우에는 바닥과 같은 매우 낮은 위치에 대한 작업이 필수 고려 사항이다.

이는 다양한 자세에서 바닥 작업뿐만 아니라 식탁에서의 작업 수행이 가능한 매니퓰레이터의 설계가 필요하며, 이를 제어하는 방법에 대한 연구도 필요하다.

매니퓰레이터의 제어에 관한 연구는 매우 오래 전부터 연구되어져 왔으며, 새로운 매니퓰레이터가 개발되어지면 성능을 검증하기 위하여 여러 가지 알고리즘이 적용되어 연구되어 왔다^[6-9].

본 논문에서는 그림 1에 보여진 것처럼 바닥에서의 작업이 가능한 서비스 로봇을 위해 두 팔 매니퓰레이터를 설계하고 제작하여 제어하고자 한다^[12]. 이전의 연구에서 설계를 위해 작업공간에 대한 분석을 수행하였다^[13]. 두 팔의 길이도 바닥에서의 작업을 수행 할 수 있도록 길게 설계되었다. 두 팔 로봇의 기구학을 분석하고 시뮬레이션을 수행하고 그 결과를 이용하여 직교좌표 공간에서의 위치 제어를 수행하였다. 실험을 통해 기구학을 검증하고 전체 시스템 구현의 동작을 검증하였다.

II . 서비스 로봇의 설계 주안점

1. 상하 가변형 허리 및 어깨 구조

로봇이 바닥과 같은 낮은 곳의 작업을 하기 위해서는 팔 길이를 길게 하면 되지만 그에 따른 하중이 증가한다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 그림 2의 양팔의 어깨부분에 높이 조절 기능을 추가하여 높은 곳에서 낮은 곳까지 작업이 가능하도록 설계하였다. 어깨 이동 가능 범위는 170mm이다.

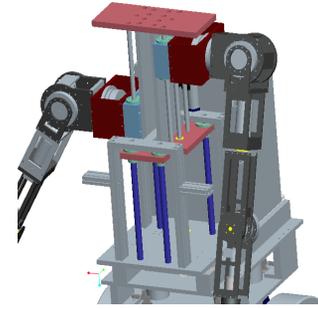


그림 2. 높이 가변형 어깨 및 허리 구조
Fig. 2. Adjustable waist and shoulder.

다른 특징으로 상체구조의 상하이동이다^[11]. 양팔을 포함하고 있는 로봇의 상체 전부를 상하로 이동하도록 하는 구조를 적용하였다. 평소에는 제일 낮은 자세를 유지하여 시스템이 차지하는 공간을 최소화하며, 필요에 따라 높이 조절 기능을 이용하여 높은 곳의 작업도 가능하게 한다. 상체구조의 이동가능 범위는 250mm이다.

2. 앞뒤 슬라이딩 허리구조

시스템의 중심축에 위치하도록 설계된 로봇의 팔은 바닥 작업시에 오히려 그 작업 영역이 제한을 받게 된다. 로봇의 길이에 변화를 주지 않는 조건에서 그림 3과 같이 로봇의 상체를 앞뒤로 슬라이딩할 수 있는 구조를 적용하였다. 몸통을 최대한 앞으로 이동하여 더 넓은 바닥 작업공간을 확보할 수 있으며, 설계된 슬라이딩 구조의 이동거리는 최대 250mm 이다.

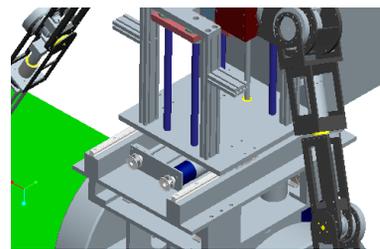


그림 3. 로봇 상체의 전후 슬라이딩 구조
Fig. 3. Sliding mechanism of an upper body.

3. 바닥작업 가능한 6자유도 매니퓰레이터

어깨 축에 3자유도, 팔꿈치 부분에 1자유도, 손목부분에 2자유도로서 총 6자유도를 갖도록 설계하였다. 그림 4는 이와 같은 조건을 고려한 로봇 매니퓰레이터의 최종설계이다. 전체 길이는 약 846mm 정도로 작업 공간이 바닥에 닿을 수 있다.

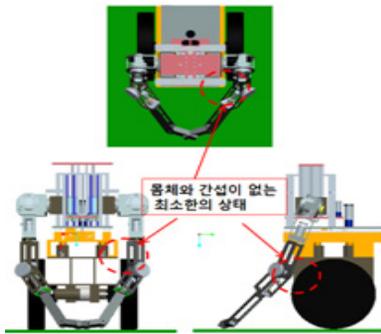


그림 4. 바닥 작업이 가능한 로봇 팔
Fig. 4. Robot arm suitable for floor tasks.

III. 두 로봇 팔의 설계 및 기구학

1. 설계

매니플레이터는 각각 6개의 회전 관절을 갖는 양팔로 이루어져있다. 각 팔은 어깨 축에 3자유도, 팔꿈치 부분에 1자유도, 손목부분에 2자유도로서 총 6자유도를 갖도록 설계되었다.

그림 5는 로봇 팔의 설계를 나타낸다. 한 팔로 약 1.5kg, 두 팔로 약 3kg의 하중을 작업할 수 있도록 고려하였다. 매니플레이터는 길이가 길어질수록 작업 범위는 넓어져 바닥 작업이 편리해질 수 있으나 상대적으로 모터의 토크나 다른 일반적인 작업에 있어서는 비효율적이다.

전체 길이는 약 846mm 정도로 작업 공간이 최대 바닥에까지 이를 수 있다.



그림 5. 로봇 팔의 설계
Fig. 5. Manipulator design,

2. 순 기구학

그림 6은 설계한 매니플레이터의 좌표계를 설정한 것으로 기준좌표계와 각 관절을 나타내는 좌표계, 그리고 팔끝의 좌표계로 구성되어 있다. 표 1은 그림 6의

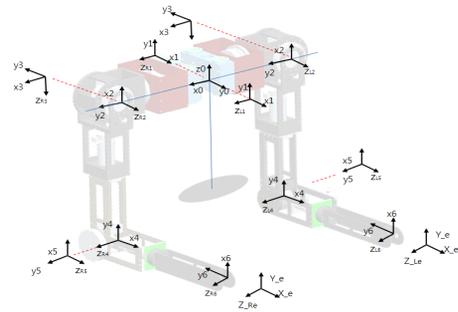


그림 6. 두 팔 로봇의 좌표
Fig. 6. coordinate system of two arm manipulator.

표 1. D-H 변수
Table 1. DH parameter.

	Right Arm				Left Arm			
	θ_i	α_i	a_i	d_i	θ_i	α_i	a_i	d_i
0	$\theta_0 (\frac{\pi}{2})$	$\frac{\pi}{2}$	0	0	$\theta_0 (\frac{\pi}{2})$	$\frac{\pi}{2}$	0	0
1	$\theta_1 (\frac{\pi}{2})$	$\frac{\pi}{2}$	0	$d_1(196)$	$\theta_1 (\frac{\pi}{2})$	$\frac{\pi}{2}$	0	$d_1(-196)$
2	$\theta_2 (0)$	$-\frac{\pi}{2}$	0	0	$\theta_2 (0)$	$-\frac{\pi}{2}$	0	0
3	$\theta_3(-\frac{\pi}{2})$	$-\frac{\pi}{2}$	0	$d_3(420)$	$\theta_3(-\frac{\pi}{2})$	$-\frac{\pi}{2}$	0	$d_3(420)$
4	$\theta_4 (0)$	$\frac{\pi}{2}$	0	0	$\theta_4 (0)$	$\frac{\pi}{2}$	0	0
5	$\theta_5 (0)$	$-\frac{\pi}{2}$	0	$d_5(426)$	$\theta_5 (0)$	$-\frac{\pi}{2}$	0	$d_5(426)$
6	$\theta_6(-\frac{\pi}{2})$	0	0	0	$\theta_6(-\frac{\pi}{2})$	0	0	0

좌표계 설정에 따른 D-H 변수들이다. 로봇의 바디를 포함하는 좌표계를 추가하여 7개의 좌표축으로 정리하였다.

표 1의 D-H 변수로부터 각 관절의 변환 행렬을 이용하여 시스템의 end-effect를 나타내는 최종행렬 T를 다음 식(1)과 같이 나타낼 수 있다.

$${}^0T_7 = {}^0A_1 {}^1A_2 {}^2A_3 {}^3A_4 {}^4A_5 {}^5A_6 {}^6A_7 = \begin{bmatrix} n_x s_x a_x p_x \\ n_y s_y a_y p_y \\ n_z s_z a_z p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$p_x = d_1 + d_5 (C\theta_2 C\theta_4 + C\theta_3 S\theta_2 S\theta_4) - a_6 C\theta_6 (C\theta_5 (C\theta_2 S\theta_4 - C\theta_3 C\theta_4 S\theta_2) + S\theta_2 S\theta_3 S\theta_5) + d_3 C\theta_2 - a_6 S\theta_6 (C\theta_2 C\theta_4 + C\theta_3 S\theta_2 S\theta_4)$$

$$p_y = a_6 S\theta_6 (S\theta_4 (S\theta_2 S\theta_3 - C\theta_2 C\theta_2 C\theta_3) + C\theta_2 C\theta_4 S\theta_2) - d_3 C\theta_2 S\theta_2 - d_5 (S\theta_4 (S\theta_2 S\theta_3 - C\theta_2 C\theta_2 C\theta_3) + C\theta_2 C\theta_4 S\theta_2) - a_6 C\theta_6 (C\theta_5 (C\theta_4 (S\theta_2 S\theta_3 - C\theta_2 C\theta_2 C\theta_3) - C\theta_2 S\theta_2 S\theta_4) + S\theta_5 (C\theta_3 S\theta_2 + C\theta_2 C\theta_2 S\theta_3)) S\theta_2 + C\theta_2 C\theta_3 S\theta_4)$$

$$p_z = d_5 (S\theta_4 (C\theta_1 S\theta_3 + C\theta_2 C\theta_3 S\theta_1) - C\theta_1 S\theta_1 S\theta_2) + a_6 C\theta_6 (C\theta_5 (C\theta_4 (C\theta_1 S\theta_3 + C\theta_2 C\theta_3 S\theta_1) + S\theta_1 S\theta_2 S\theta_4) + S\theta_5 (C\theta_1 C\theta_3 - C\theta_2 S\theta_1 S\theta_3)) - d_3 S\theta_1 S\theta_2 - a_6 S\theta_6 (S\theta_4 (C\theta_1 S\theta_3 + C\theta_2 C\theta_3 S\theta_1) - C\theta_1 S\theta_1 S\theta_2) \quad (2)$$

식 (1)의 P_x, P_y, P_z 는 end-effect의 위치를 나타내는 값으로 식(2)와 같이 나타난다.

3. 역 기구학

6자유도 매니퓰레이터의 경우에 팔끝의 위치 및 자세를 알고 있는 경우에 대한 역기구학이 이미 많은 연구가 되어 있다^[6~8].

본 논문에서는 설계된 6자유도 매니퓰레이터가 아닌 실제 제작된 5자유도 매니퓰레이터를 기준으로 역기구학을 해석하였으며 팔끝의 위치만 알고 있는 경우에 대해서 기술하였다.

일반적인 매니퓰레이터의 경우 그림 7의 1,2,4 관절에 의해 P₆의 위치가 정의되지만 본 로봇의 경우 그림 8과 같이 관절 3에 의해 여러 가지 솔루션이 존재하는 특징을 갖고 있다.

다수해가 존재하며 팔끝의 위치만 아는 경우 p_{4x}를 미리 결정하는 방법으로 역기구학의 해를 구할 수 있다. 다음과 같은 구속조건을 이용하여 p_{4x}를 결정하였다.

팔끝의 좌표값을 알고 p_{4x} 값을 알면 그림 10에서 식

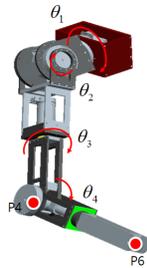


그림 7. 각 관절과 P6의 관계
Fig. 7. Relation between P6 and joints.

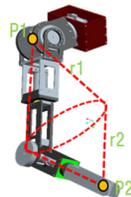


그림 8. 여러 가지 해가 존재
Fig. 8. Multiple solutions.

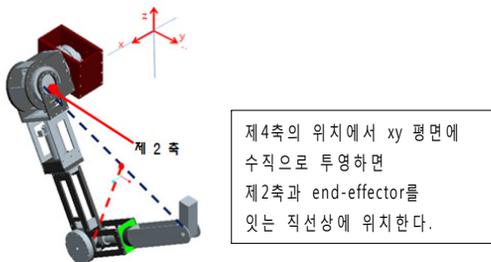


그림 9. 역기구학 해석을 위한 구속조건
Fig. 9. Kinematic constraint for inverse kinematics.

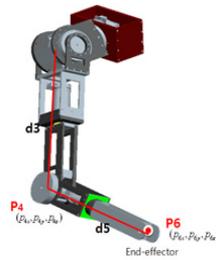


그림 10. 링크와 좌표의 관계
Fig. 10. Link and coordinates

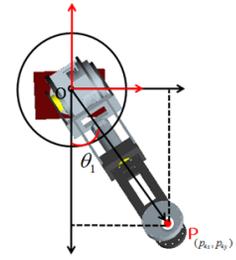


그림 11. 점 P₄를 이용한 theta_1
Fig. 11. theta_1 using P₄

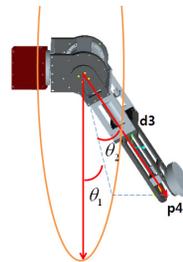


그림 12. p_{4x}를 이용한 theta_2
Fig. 12. theta_2 using p_{4x}

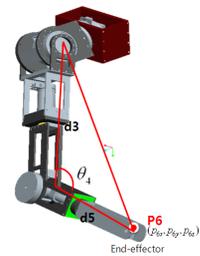


그림 13. P₆를 이용한 theta_4
Fig. 13. theta_4 using P₆.

(3)의 두 연립방정식을 유도할 수 있다.

$$\begin{aligned} (x_0 - p_{4x})^2 + (y_0 - p_{4y})^2 + (z_0 - p_{4z})^2 &= d_3^2 \\ (p_{6x} - p_{4x})^2 + (p_{6y} - p_{4y})^2 + (p_{6z} - p_{4z})^2 &= d_5^2 \end{aligned} \tag{3}$$

$$\sin\theta_1 = \left(\frac{p_y}{d_3}\right), \quad \cos\theta_1 = \left(\frac{p_z}{d_3}\right) \tag{4}$$

그러므로 관절 1은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\theta_1 = \tan^{-1}\left(\frac{\sin\theta_1}{\cos\theta_1}\right) \tag{5}$$

식 (3)의 두 연립방정식을 통해 p_{4y}, p_{4z}를 계산해 낼 수 있으므로 P₄의 위치가 결정된다. P₄의 위치를 알게 되면 식 (4)을 이용하여 식 (5)과 같이 theta_1의 값이 구해진다.

theta_1과 theta_2의 기구학적 특성에 의해 theta_1이 어떤 값을 가져도 theta_2에 의해 p_{4x}가 결정된다. 따라서 위 식(4)에서 p_{4x}가 정해지면 그림 12의 theta_2는 식(6)과 같이 정의된다.

$$\theta_2 = \text{asin}\left(\frac{p_{4x}}{d_3}\right) \tag{6}$$

theta_4의 경우 그림 13에 나타나듯이 팔끝의 좌표가 결정되면 코사인법칙을 이용하여 식(8)과 같이 유도된다.

$$R = \sqrt{p_{6x}^2 + p_{6y}^2 + p_{6z}^2}, \cos\theta_4 = \frac{d_3^2 + d_5^2 - R^2}{2d_3d_5},$$

$$\sin\theta_4 = \sqrt{1 - \cos^2\theta_4} \quad (7)$$

$$\theta_4 = \tan^{-1}\left(\frac{\sin\theta_4}{\cos\theta_4}\right) \quad (8)$$

팔끝의 위치는 이미 알고 있으므로 위에서 구해진 θ_2 , θ_4 를 팔끝의 x축 좌표를 나타내는 식(9)에 대입하면 식(11)과 같이 θ_3 를 구할 수 있다.

$$P_{6x} = d_3\cos\theta_2 + d_5\cos\theta_2\cos\theta_4 + d_5\cos\theta_3\sin\theta_2\sin\theta_4 + d_5 \quad (9)$$

$$\cos\theta_3 = \frac{P_{6x} - d_3\cos\theta_2 - d_5\cos\theta_2\cos\theta_4 - d_5}{d_5\sin\theta_2\sin\theta_4}, \sin\theta_3 = \sqrt{1 - \cos^2\theta_3} \quad (10)$$

$$\theta_3 = \tan^{-1}\left(\frac{\sin\theta_3}{\cos\theta_3}\right) \quad (11)$$

θ_5 의 경우 팔끝의 위치에 관여하지 않으므로 초기값을 유지한다.

4. 기구학 시뮬레이션

그림 14(a),(b)는 각각 X축과 Y축을 따라 0.2m 이동하는 경로이고, 그림 14(c)는 Z축을 따라 0.15m 이동하는 경로에 대한 시뮬레이션 결과이다. 그림 14(d)는 지름 0.4m의 원의 경로를 따르도록 하는 시뮬레이션의 결과를 나타낸다. 모든 경로에 대해 정확하게 추종하고 있음을 확인할 수 있으므로 기구학을 검증하였다.

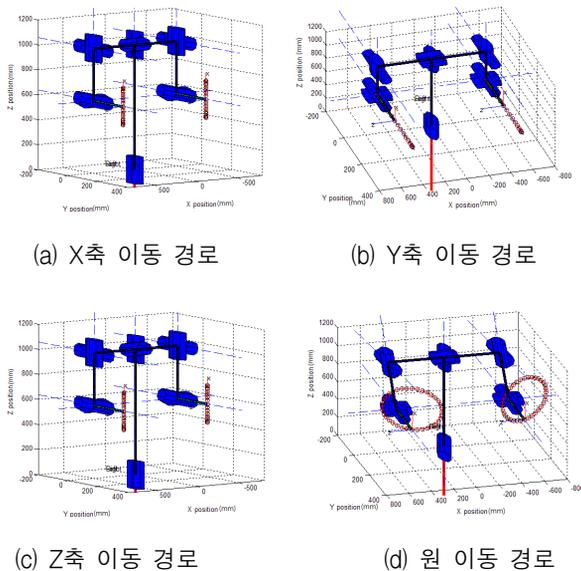


그림 14. 역기구학 시뮬레이션
Fig. 14. Inverse-kinematics Simulation.

IV. 두 팔 로봇 시스템 제작

관절 1과 관절 2는 팔 전체의 무게를 감당해야 하므로 효율이 좋고 짧은 길이가 특징인 90W급의 flat motor를 선정하였으며, 일반기어에 대신 하모닉드라이브를 사용하였다. 이러한 구조는 높은 토크를 위한 큰 기어비를 구현하면서도 팔의 폭을 최소화시킬 수 있으며 backlash가 거의 없다는 장점을 갖는다.

관절 3는 모터의 회전축과 팔의 무게 중심 축과의 거리차가 크지 않아 큰 토크를 필요로 하지 않고 길이에 대한 제약도 크지 않아 50W급의 flat motor와 일반 기어를 조합하여 사용하였다.

관절 4는 팔꿈치 부분이기에 때문에 어깨 부분 보다는 낮은 토크를 필요로 한다. 단, 관절 1,2와 마찬가지로 모터와 기어의 길이가 매니플레이터의 폭에 직접적으로 영향을 미치는 구조이다. 따라서 관절 1,2 보다는 작은 50W 급의 flat motor를 선정하였으며 하모닉드라이브를 사용하여 팔의 폭을 최소화시켰다.

관절 5는 팔 끝단 구조로 손목부분에 위치한다. 따라서 관절 3보다도 작은 토크로도 충분하며 길이에 대한 제약도 크지 않다. 다만 팔의 끝부분이기 때문에 무게를 최소화하기 위해 90W급의 powermax motor와 일반

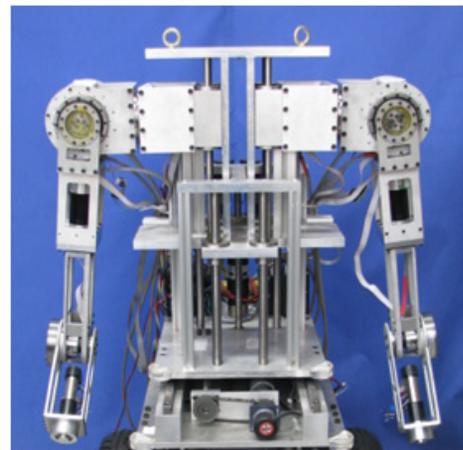


그림 15. 5 DOF 로봇팔의 모습

Fig. 15. 5 D.O.F manipulator.

표 2. 각 관절의 구동기의 제원

Table 2. specification of actuators for each joint.

관절	모터 사양	기어 및 하모닉드라이브	Range
1	Flat 90W	HarmonicDrive (160:1)	-180° ~ 180°
2	Flat 90W	HarmonicDrive (160:1)	0° ~ 180°
3	Flat 50W	Gear (156:1)	-180° ~ 180°
4	Flat 50W	HarmonicDrive (160:1)	-135° ~ 135°
5	powermax22 90W	Gear (190:1)	-180° ~ 180°

기어헤드를 조합하여 사용하였다.

이와 같이 제작된 5자유도 양팔 매니플레이터의 전체 모습은 그림 15와 같다. 각 매니플레이터의 무게는 약 7kg이며 payload는 1.5kg/arm 이다. 표 2는 매니플레이터의 간단한 제원을 정리한 것이다.

V. 실험 결과

1. 실험환경

그림 16은 전체 시스템 구성을 간단히 나타낸 것이다. PC는 주로 모니터링 및 데이터의 저장을 위해 사용되며 사용자에게 의해 경로를 생성하는 역할도 할 수 있다. 원하는 경로가 정해지면 DSP에서 역기구학 해석을 수행하고 이를 CAN 통신을 통해 모터드라이버로 전달하여 각 관절의 모터를 구동시킴과 모터드라이버에서 측정되는 각 모터의 엔코더 데이터를 역시 CAN 통신을 통해 DSP로 보내지게 되며 이와 같은 작업을 통해 각 관절을 원하는 각도로 제어하게 된다.

그림 17은 매니플레이터 제어를 위한 보드이다. 매니플레이터의 실질적 제어는 DSP와 motor driver 사이의 CAN 통신에 의해서 이루어진다. 본 시스템에서는 DSP28335 모델을 사용하였으며, CAN 통신을 위해 SN65HVD235D라는 최대 1Mbps의 송수신을 지원하는

ID	Length of data	Object Index	Sub Index	Data
	(1byte)	(2byte)	(1byte)	(4byte)

그림 18. CAN 통신 프로토콜
Fig. 18. CAN protocol for control of manipulator.

3.3V CAN 트랜시버를 사용하였다.

모든 모터 드라이버에는 공통된 CAN protocol을 제공하고 있다. 그림 18은 매니플레이터 제어에 사용된 protocol을 간단히 나타낸 것이다.

모터 드라이버는 기본적으로 600+N의 ID를 사용한다. 리턴 값을 보낼 때는 580+N의 ID를 사용하여 보내온다. DSP에서의 CAN 통신은 mailbox라는 구조를 통해 이루어진다. 따라서 송신 mailbox의 ID 설정을 600+N으로 수신 mailbox의 ID 설정을 580+N으로 해주면 된다. object-index와 sub-index의 조합은 통신하고자 하는 기능의 정의라고 할 수 있다. 최대 4byte로 구성되는 data의 경우에도 low byte와 high byte 순서가 반대이다.

2. 제어기 설계

매니플레이터 제어를 위해 선형인 PD 제어기를 설계하고 실험을 수행하였다. 각 관절에서의 제어기의 제어 입력은 다음과 같다.

$$\tau = k_d \dot{e} + k_p e \tag{12}$$

여기서 $e = q_d - q_a, e \in R^{5 \times 1}$ 이고 $k_p, k_d \in R^{5 \times 5}$ 는 제어기 이득 행렬이다.

기준 관절각도, q_d 는 식(13)과 같이 기준 위치, x_d 를 역기구학 함수 G_{IK} 를 이용하여 구해진다.

$$q_d = G_{IK}(x_d) \tag{13}$$

$x_d, x_a \in R^{3 \times 1}$ 는 기준과 실제 직교좌표 공간에서의 위치이고 $q_d, q_a \in R^{5 \times 1}$ 는 관절의 기준 및 실제 각도 벡터이다.

그림 19는 실험에 적용된 PD 제어기의 블록도이다.

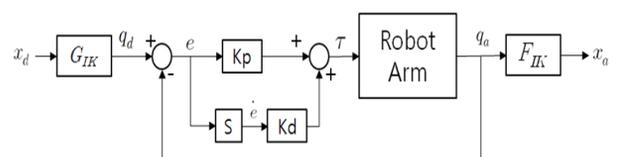


그림 19. 제어기 블록 다이어그램
Fig. 19. Control block diagram.

그림 16. 전체 시스템 구조
Fig. 16. Overall system configuration.

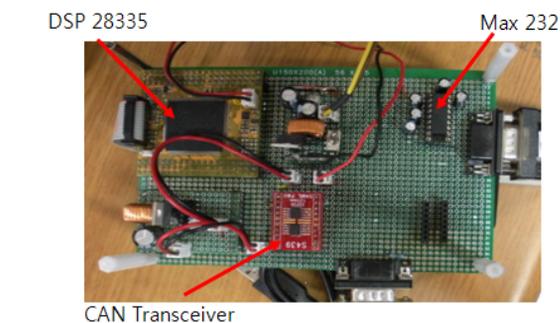


그림 17. 제어 하드웨어
Fig. 17. Control hardware board.

3. 경로 제어 실험

3차원 공간에서 왼팔은 X-Y 평면, 오른팔은 X-Z 평면상에서 움직이는 원의 경로를 추종하는 실험을 수행하였다. 그림 20은 실험을 위해 설정된 제어 경로를 나타낸 것이다. 왼팔은 X-Y 평면상에 지름 0.3m의 원을 그리는 경로를 설정하였으며 오른팔은 X-Z 평면상에 지름 0.3m의 원을 그리는 경로를 설정하였다.

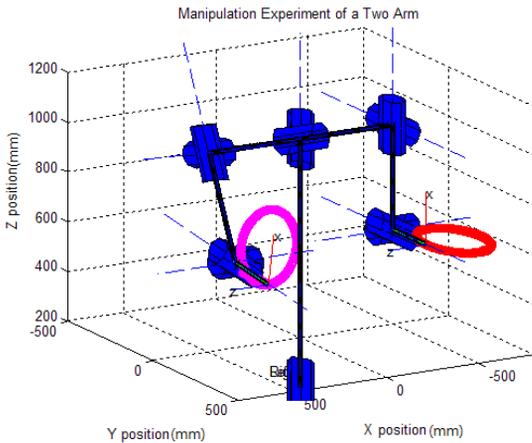


그림 20. 매니퓰레이터 제어 경로
Fig. 20. Desired trajectories.

3.1 왼팔 제어 결과

그림 21은 왼쪽 팔의 설정된 경로와 실험을 통해 제어된 경로를 비교하여 나타낸 것이다.

그림 22는 주어진 경로로 이동하는 동안 X,Y,Z 축으로의 원하는 경로에 대한 제어 결과를 나타낸 것이다. X,Y,Z축 모두에서 2mm 이내의 오차 범위를 보이며 원활하게 원하는 경로를 추종하였음을 확인하였다.

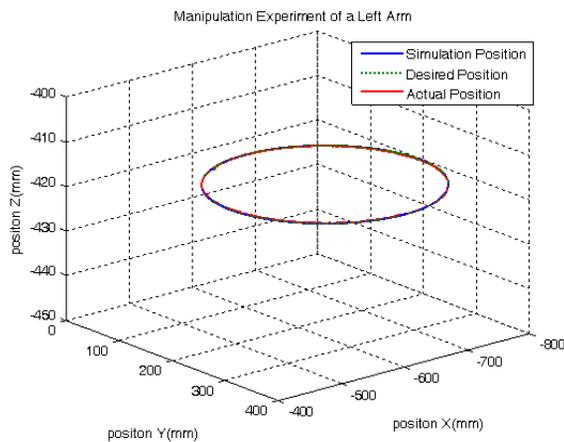
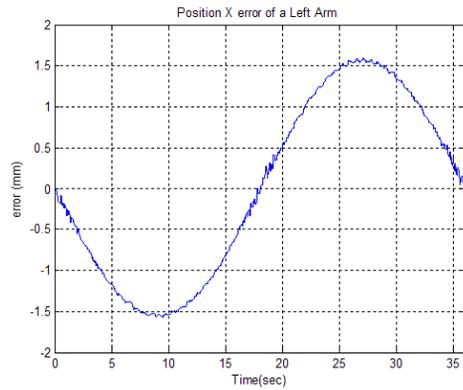
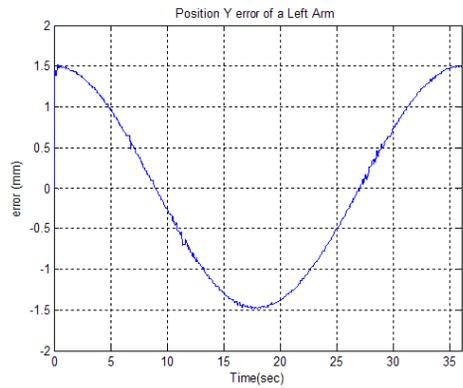


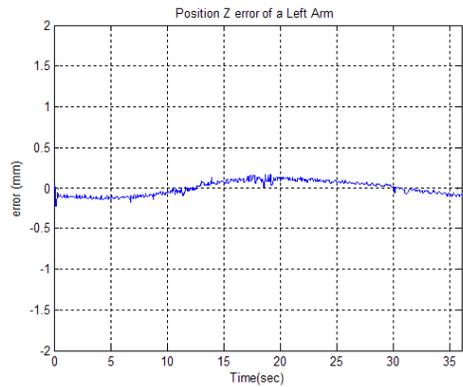
그림 21. 왼팔 경로 제어
Fig. 21. Left arm tracking result.



(a) error of x axis



(b) error of y axis



(c) error of z axis

그림 22. X,Y,Z 축 제어 결과
Fig. 22. XYZ axis tracking result.

3.2 오른팔 제어 결과

그림 23은 설정된 경로와 실험을 통해 제어된 경로를 비교하여 나타낸 것이며 그림 24는 오른팔이 주어진 경로로 이동하는 동안 X,Y,Z 축의 제어 오차를 나타낸 것이다.

오른팔도 연속적인 오차 결과를 살펴보면 X,Y,Z축

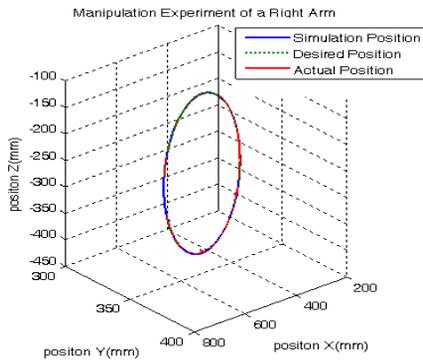
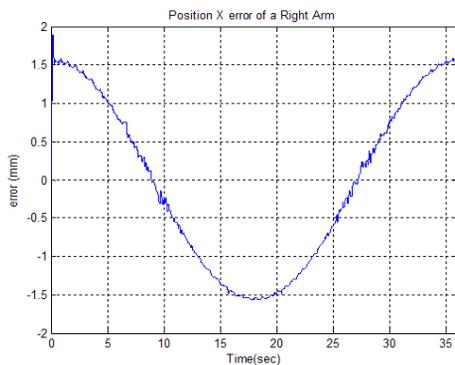
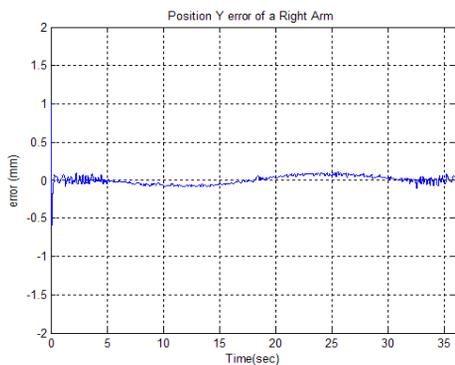


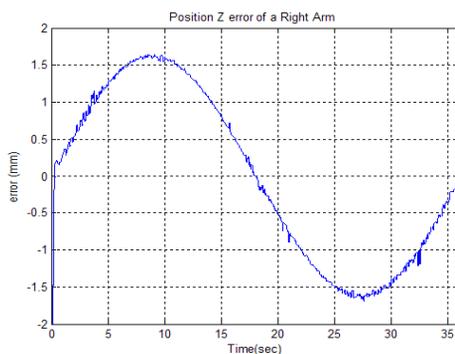
그림 23. 오른팔 경로 제어
Fig. 23. Right arm tracking result.



(a) X axis error



(b) Y axis error



(c) Z axis error

그림 24. X,Y,Z 축으로의 제어 결과
Fig. 24. XYZ axis tracking result.

모두에서 2mm 이내의 오차 범위를 보이며 원활하게 원하는 경로를 추종하였음을 확인할 수 있다.

VI. 결 론

본 논문은 바닥작업이 가능한 서비스 로봇을 위해 개발된 두 팔 매니퓰레이터의 개발에 관한 연구를 기술하였다. 로봇의 용도, 하중, 길이 등을 고려하여 6자유도의 매니퓰레이터를 설계하였으며, 손목부분이 완성되지 않아 이 부분을 제외한 5자유도 매니퓰레이터를 제작하였다. 실험을 위해 DSP를 이용한 제어 보드를 구성하였으며, 기구학적 해석을 수행하고 이를 이용하여 양팔 매니퓰레이터를 제어하였다. 각 관절의 다양한 움직임을 살펴보기 위해 왼팔과 오른팔이 서로 다른 경로를 추종하도록 실험하여 기구학 및 전체 시스템의 동작을 검증하였다.

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] 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.
- [4] 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.
- [5] H. Iwata, and S. Sugano, "Design of Human Symbiotic Robot TWENDY-ONE", IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 580-586, 2009.
- [6] J. J. Craig, Introduction to Robotics, Mechanics and Control, 3rd Ed., Prentice Hall, 2005.
- [7] 송덕희, 노진석, 정슬, "다관절 휴머노이드 상체 로봇의 제어를 위한 신경망 보상 퍼지 제어기 구현

- 및 실험”, 제어·자동화·시스템학회 논문지, 제13권 제7호, pp. 998-1004, 2008.
- [8] 김형욱, 황병훈, 박진서, 서일홍, 이병주, “두 팔 로봇의 조립 작업을 위한 지능적 조립 계획 시스템”, 전자공학 학술발표논문지, pp.76-79, 1997.
- [9] 임성진, 이지영, 한창수, “여자유도 듀얼암 로봇의 경로 계획”, 대한전자공학회 2008년 정기총회 및 추계종합학술대회 2008.11, pp. 1093-1094, 2008.
- [10] 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.
- [11] 안재국, 정슬, “높이 조절 및 하체 분리형 실내용 서비스 이동 로봇의 제작 및 제어, 전자공학회, 48권 SC편 1호, pp. 39-46, 2011.
- [12] S. J. Lee and S. Jung, “Novel design and control home service mobile robot for Korean floor-living life style : KOBOKER”, URAI, pp. 863-867, 2011.
- [13] Y. G. Bae and S. Jung, “Kinematic design and workspace analysis of a Korean service robot: KOBOKER”, ICCAS, pp. 833-836, 2011.

— 저 자 소 개 —



배 영 결(학생회원)
2004년 충남대학교 메카트로닉스 공학과 학사 졸업.
2006년 충남대학교 메카트로닉스 공학과 석사 졸업
2009년 충남대학교 메카트로닉스 공학과 박사 과정.

<주관심분야 : 로봇 매니플레이터, 서비스 로봇, 힘제어응용>



정 슬(정회원)-교신저자
1988년 미국 웨인주립대학교 전기 및 컴퓨터공학과 학사 졸업.
1991년 미국 캘리포니아 데이비스 대학교 전기 및 컴퓨터 공학과 석사 졸업.

1996년 미국 캘리포니아 데이비스대학교 전기 및 컴퓨터 공학과 박사 졸업.

1997년~현재 충남대학교 메카트로닉스 공학과 교수

<주관심분야 : 지능서비스로봇, 로봇교육>