

두 팔이 달린 이동 로봇의 위치기반 힘 제어응용

Position-Based Force Control Application of a Mobile Robot with Two Arms

안재국, 정슬*

(Jae Kook Ahn¹ and Seul Jung¹)

¹Chungnam National University

Abstract: This paper presents the position-based force control application of a mobile manipulator. The mobile manipulator consists of two six DOF manipulators and a mobile robot. Kinematics of the robot is analyzed and simulated to validate the analysis. A position-based force control technique is applied to the robot by adding an outer loop to interact with the environment. Experimental studies of force control applications of robot arm and interaction with a human operator are conducted. Experimental results show that the robot arm is well regulated to follow the desired force.

Keywords: force control, interaction, a mobile manipulator

1. 서론

대부분의 산업용 로봇은 외팔구조를 가지고 있기 때문에 작업자가 두 손을 사용하여 작업하고 있는 생산라인에는 적용이 어렵다. 이러한 이유로 양팔형 산업용 로봇에 대한 관심이 증대되고 있으며 실제로 일부 완성 차 업체에서는 로봇 제조업체와 공동으로 자동차 생산라인에 적용될 수 있는 양팔형 산업용 로봇을 개발하려고 노력하고 있다.

더욱이 최근에는 주어진 일만 되풀이하는 산업용 로봇 구조가 아닌, 가정에서 필요에 따라 일을 할 수 있는 가정용 로봇에 대한 관심이 높아지고 있다. 미국, 일본에서는 음식을 나르거나, 물을 켜에 따르는 로봇, Personal robots [1], 또는 음식을 만드는 로봇 Twendy-one을 소개하였다[2].

국내에서도 가정용 서비스로봇에 대한 연구가 활발하게 진행되어 왔다. 보행에 중점을 둔 휴머노이드 로봇, HUBO를 비롯하여[3], KIST의 로봇은 팔의 움직임을 강조하여 다양한 작업을 할 수 있도록 구성하였다[4,5]. 하지만 가정용 서비스 로봇을 구현하는 현실적인 부분에서는 보행보다는 바퀴구동의 서비스 로봇이 주가 된다. 이동성도 확보하고 무엇보다 안정적이기 때문이다. 이처럼 대부분의 서비스로봇은 이동로봇 기반에 로봇 팔을 장착한 모바일 매니플레이터 구조를 갖는다.

이동성보다는 양팔의 작업성이 중요하게 요구되므로 대부분의 양팔 로봇의 작업은 영상을 기반으로 하는 정확한 위치제어기술 중심으로 구성되어 있다[5,6]. 하지만 위치제

어 기술로는 작업의 한계가 있다. 예컨대 로봇이 문을 여는 작업도 위치제어 기술만으로는 어렵다. 위치제어기술에 더하여 요구되는 기술이 힘제어 기술이다. 가정에서 로봇이 하게 될 작업의 대부분은 대상체와 접촉을 이루기 때문이다. 대상체와 작업을 수행할 때도 정확한 위치제어 기반에 접촉 힘제어 기술이 함께 적용되어야 성공적으로 수행할 수 있다.

[7]의 선행연구에서는 그림 1처럼 두 바퀴 구동의 이동 로봇위에 양팔 로봇을 제작하여 결합하였다. 대표적인 두 바퀴 구동 이동로봇은 일인용 운송 시스템으로 상용화 된 Segway이다[8]. 두 바퀴로 움직이는 로봇은 좁은 공간에서의 움직임이 자유로운 장점이 있지만 항상 균형을 유지해야 한다[9].

본 논문에서는 이동로봇의 위치제어뿐만 아니라 로봇팔의 위치제어를 수행하고 대상체와의 협조 제어를 고려하여 힘제어를 수행한다. 선행연구에서는 로봇팔의 한축 힘제어를 구현하였다[10].

힘 작용 방식은 로봇의 팔 끝에 힘 센서를 장착하고, 그 힘을 모니터링 하면서 제어를 한다. 힘제어 방식으로는 다

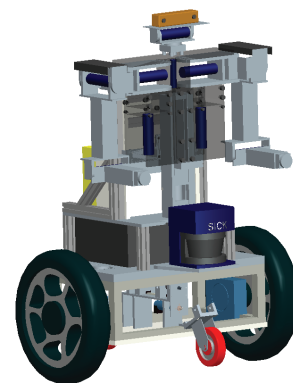


그림 1. 두 팔 달린 서비스 로봇의 개념도.

Fig. 1. Concept of a mobile manipulator with two arms.

* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수: 2012. 11. 20., 수정: 2013. 1. 16., 채택확정: 2013. 1. 25.

안재국, 정슬: 충남대학교 메카트로닉스공학과

(twlove11@naver.com/jungs@cnu.ac.kr)

※ 본 논문의 일부는 2009 CICS 학술대회에서 발표되었음.

※ 본 논문은 교육과학기술부의 기초연구사업과 지식 경제부의 서비스로봇 인력양성 AIM 센터에서 일부 지원하여 연구하였으며 지원에 감사드립니다.

양한 방식이 제안되었으나[11-13] 본 논문에서는 위치기반 임피던스 힘제어 방식을 적용하였다. 인간과의 협조 제어를 위해 로봇 팔의 3축에 대한 힘제어를 수행한다.

위치기반의 임피던스 힘 제어는 외부의 힘의 변화량에 따라 위치를 제어하는 방법으로 기존의 시스템의 제어구조를 변경하지 않고 힘 제어를 구현할 수 있는 장점이 있다. 위치기반 힘제어 방식의 성능은 실험을 통하여 검증하였다.

II. 기구학

1. 로봇팔 기구학

위치제어나 힘제어를 구현하기 위해서는 카테시안의 좌표를 조인트 공간으로 변환한 다음 조인트 공간에서 제어를 해야 하는데 이는 역기구학이 필요한 이유이다.

매니플레이터의 팔 끝의 위치는 카테시안 공간에서 $Z = [x \ y \ z]^T$ 로 표현되지만, 각 조인트는 $\theta = [\theta_1 \ \theta_2 \ \theta_3 \ \theta_4 \ \theta_5 \ \theta_6]^T$ 로 표현된다. 따라서, 카테시안 공간 좌표와 조인트 공간 좌표 사이의 관계를 알 수 있는 역기구학이 필요하게 된다.

만약 팔 끝 좌표 P_6 와 회전 (n, s, a) 이 우선적으로 결정되어 있다면 다음 식에 의해 P_5 의 좌표가 구해지게 된다.

$$\vec{P}_5 = \vec{P}_6 - d_6 \vec{a} \quad (1)$$

$$P_{5x} = (-C_1 C_2 S_3 + S_1 C_3) d_4 + S_1 d_2 \quad (2)$$

$$P_{5y} = (-S_1 C_2 S_3 - C_1 C_3) d_4 - C_1 d_2 \quad (3)$$

$$P_{5z} = -S_2 S_3 d_4 \quad (4)$$

단, $\vec{a} = [a_x \ a_y \ a_z]^T$ 이다. 위의 식에서

$$P_5^2 = P_{5x}^2 + P_{5y}^2 + P_{5z}^2 = 2d_2 d_4 C_3 + d_2^2 + d_4^2 \quad (5)$$

여기서 $C_3 = \frac{P_5^2 - d_2^2 - d_4^2}{2d_2 d_4}$, $S_3 = \pm \sqrt{1 - C_3^2}$.

$$\theta_3 = \text{atan}\left(\pm \frac{\sqrt{1 - C_3^2}}{C_3}\right) \quad (6)$$

위 식을 이용하여

$$S_2 = -\frac{P_{5z}}{S_3 d_4}, \quad C_2 = \pm \sqrt{1 - S_2^2} \quad (7)$$

$$\theta_2 = \text{atan}\left(\mp \frac{S_2}{\sqrt{1 - S_2^2}}\right) \quad (8)$$

다음과 같이 정리할 수 있다.

$$P_{5x} = (-C_2 S_3 d_4) C_1 + (d_2 + C_3 d_4) S_1 \quad (9)$$

$$P_{5y} = (-C_3 d_4 - d_2) C_1 + (C_2 S_3 d_4) S_1 \quad (10)$$

위의 식에 Cramer 법칙을 적용하여 연립방정식을 풀면

$$\tan \theta_1 = \frac{S_1}{C_1} = \frac{\begin{vmatrix} -C_2 S_3 d_4 & P_{5x} \\ -C_3 d_4 - d_2 & P_{5y} \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} P_{5x} d_2 + C_3 d_4 \\ P_{5y} - C_2 S_3 d_4 \end{vmatrix}}$$

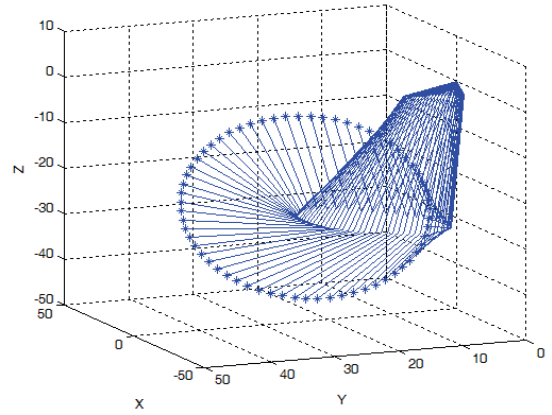


그림 2. 원 경로 생성을 위한 역기구학 확인.

Fig. 2. Confirmation of inverse kinematics.

$$= -\frac{P_{5x}(C_3 d_4 + d_2) - P_{5y}(C_2 S_3 d_4)}{P_{5x}(C_2 S_3 d_4) + P_{5y}(d_2 + C_3 d_4)} \quad (11)$$

$$\theta_1 = \text{atan}\left(\frac{S_1}{C_1}\right) \quad (12)$$

θ_4 , θ_5 , θ_6 의 경우 아래의 식을 이용하면 간단하게 구할 수 있다.

$${}^3T_6 = {}^0T_3^{-1} {}^{10}T_6 \quad (13)$$

$$= \begin{bmatrix} C_4 C_5 C_6 - S_4 S_6 & -C_4 C_5 S_6 - S_4 C_6 & C_4 S_5 & d_6 C_4 S_5 \\ C_4 S_6 + S_4 C_5 C_6 & C_4 C_6 - S_4 C_5 S_6 & S_4 S_5 & d_6 S_4 S_5 \\ -S_5 C_6 & S_5 S_6 & C_5 & d_4 + d_6 C_5 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\theta_4 = \text{atan}\left(\frac{S_4 S_5}{C_4 S_5}\right) \quad (14)$$

$$\theta_5 = \text{atan}\left(\pm \frac{\sqrt{1 - C_5^2}}{C_5}\right) \quad (15)$$

$$\theta_6 = \text{atan}\left(\frac{S_5 S_6}{S_5 S_6}\right) \quad (16)$$

2. 역기구학 검증

앞 절에서 구한 역기구학을 시뮬레이션을 통해 검증하였다. 그림 2에서는 먼저 순기구학을 *로 표시하고 역기구학으로 구한 좌표를 선으로 표기하여 순기구학과 일치하는지를 확인하였다.

III. 위치기반 힘 제어

1. 위치제어

힘제어를 적용하기 전에 위치제어가 선행되어야 한다. 그림 3은 위치제어 블록도를 나타낸다. 조인트 토크는 위치 오차에 의해 생성되며, 제어기로는 PID 제어기를 사용한다.

$$\tau(t) = K_P e(t) + K_I \int e(t) dt + K_D \dot{e}(t) \quad (17)$$

여기서 오차 $e(t) = q_d(t) - q(t)$ 이고 K_P, K_I, K_D 는 PID 제어기의 이득값으로 각 행렬의 대각요소의 값으로 $K_P = 2.5$, $K_I = 0.4$, $K_D = 0.5$ 를 사용하였다.

2. 위치기반 힘제어

그림 4는 위치기반 힘제어 블록도를 나타낸 것이다. 그림 3의 위치제어 블록에 외부 힘제어 루프를 추가하여 기준 입력을 조절하는 구조이다. 이 구조의 장점으로 기존의 위치제어 블록을 수정하지 않고 외부에서 수정하여 힘제어를 수행할 수 있다는 것이다.

힘제어의 영향을 받은 기준 경로는 다음과 같이 변경된다.

$$x_d = x_e + x_a \tag{18}$$

여기서 x_e 는 대상체의 위치를 나타내고 x_a 는 힘제어로부터의 조절 변수이다.

그림 5에서 보면 외부 루프의 힘제어에서는 힘오차 $f_e = f_c - f_d$ 를 피드백하게 된다. 센서값 f_c 와 목표 힘 f_d 의 차이 f_e 를 보상하기 위한 f_m 을 생성한다. 이 힘오차는 두 번의 적분을 통해 위치값으로 표현된다.

$$x_a = \iint f_m dt dt = \iint \frac{f_c - f_d}{k_H} dt dt \tag{19}$$

여기서 x_d 는 생성되는 경로이고 k_H 는 상수이다.

동역학의 모델링을 통해 위치기반 힘제어에 대한 시뮬레이션을 수행하였다. 카테시안 좌표와 조인트 값의 변환을 위한 역기구학이 사용되었으며, 로봇팔 끝 위치를 확인하기 위해서는 순기구학을 사용하였다.

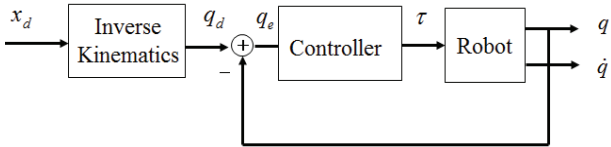


그림 3. 조인트 공간에서의 제어블록도.

Fig. 3. Control block diagram in joint space.

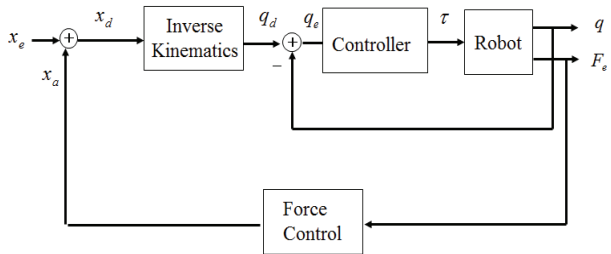


그림 4. 위치기반 힘제어의 제어블럭다이아그램.

Fig. 4. Position-based force control block diagram.

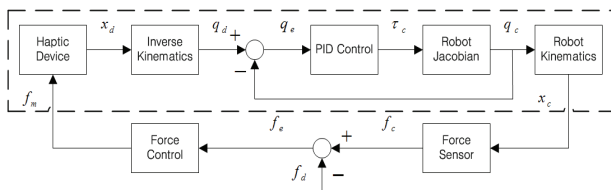
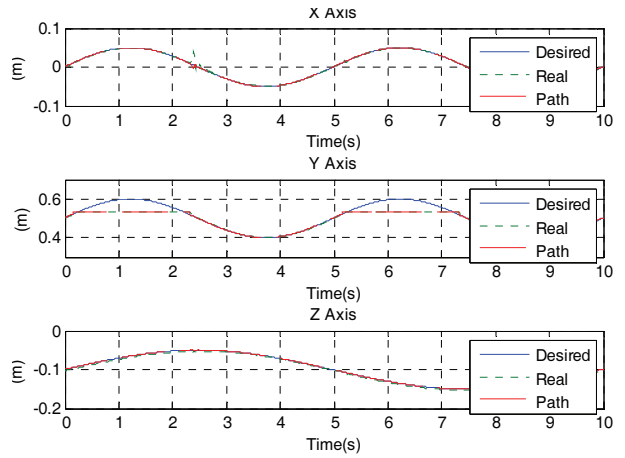
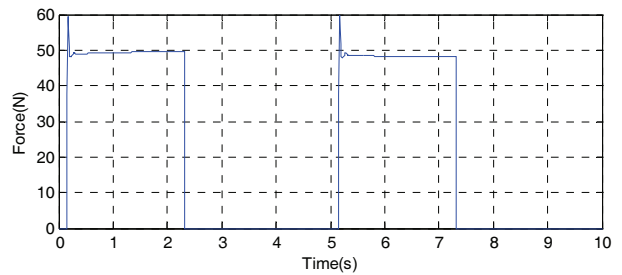


그림 5. 힘오차기반 힘제어 블록다이아그램.

Fig. 5. Force control block diagram based on force error.



(a) Position tracking result.



(b) Force tracking result.

그림 6. 힘제어 시뮬레이션 결과.

Fig. 6. Simulation results of force control.

로봇 팔의 끝점은 X-Y-Z의 3축으로 이루어져 있고 각 축이 주기가 다른 사인경로를 추종하도록 하였고, Y축(0.52 m)에 강성도가 $k_c = 5000$ N/m대상체가 있다고 가정하여 힘제어를 구현하였다. 원하는 힘은 $f_d = 50$ N로 설정하였다.

위치제어기로 PD 제어와 힘 제어가 더해진 형태로, 힘제어는 식 (19)를 이용하여 구현하였다. 그림 6의 그래프에서 확인할 수 있듯이 각 축에 대한 사인과 경로를 잘 추종하고 있음을 확인할 수 있었고, Y축 상에서는 대상체가 있는 지점에서는 위치제어가 실행되지 않고 힘 제어가 이루어지고 있음을 볼 수 있다. 그림 6(b)에서 보면 접촉 시 발생할 수 있는 충격으로 인해 힘의 오버슈트가 발생하지만, 전체적인 힘 추종 양상은 기준힘(50N)을 추종하는 것을 확인할 수 있었다.

3. 위치기반의 임피던스 힘 제어

위치기반의 임피던스 힘 제어는 임피던스 힘제어를 토크에서 보상하기보다는 기준입력인 위치에 보상한다. 기준위치 X_c 는 $X_c = X_d - X_a$ 이고, X_a 는 접촉 힘 F_c 와 관계한다. X_a 와 F_c 는 다음의 임피던스 식으로 표현된다.

$$-F_c = M\ddot{X}_a + B\dot{X}_a + KX_a \tag{20}$$

식 (20)을 위치 변수 $X_a(s)$ 에 대하여 정리하면 다음과 같은 2차 임피던스 필터의 구조를 나타낸다.

$$X_a(s) = -\frac{1}{Ms^2 + Bs + K} F_c(s) \tag{21}$$

위의 식을 통해 목적 힘에 따른 목적 위치의 관계를 확인할 수 있다. 주어지는 힘 f_c 에 따른 보정 위치 x_a 에 대한 관계는 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$x_a(t) = \frac{1}{\alpha + \beta + 1} ((2\alpha + \beta)x_a(t-1) - \alpha x_a(t-2) - \gamma f_c(t)) \quad (22)$$

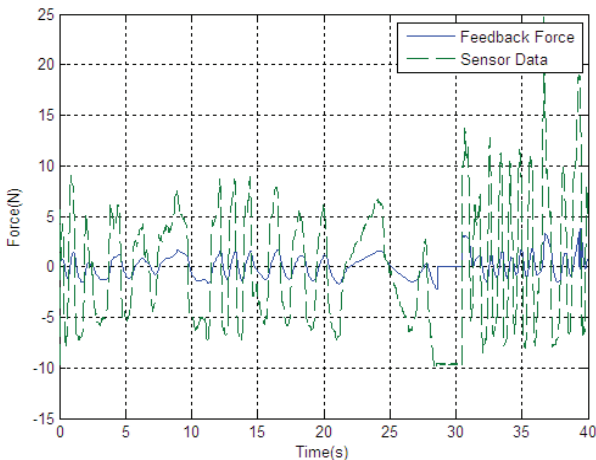
여기서 $\alpha = \frac{M}{K\Delta t^2}$, $\beta = \frac{B}{K\Delta t}$, $\gamma = \frac{1}{K}$ 이고 Δt 는 샘플링 시간이다. 힘 f_c 에 의해 만들어지는 위치 x_a 는 식 (22)와 같은 형태로 표현된다.

IV. 실험

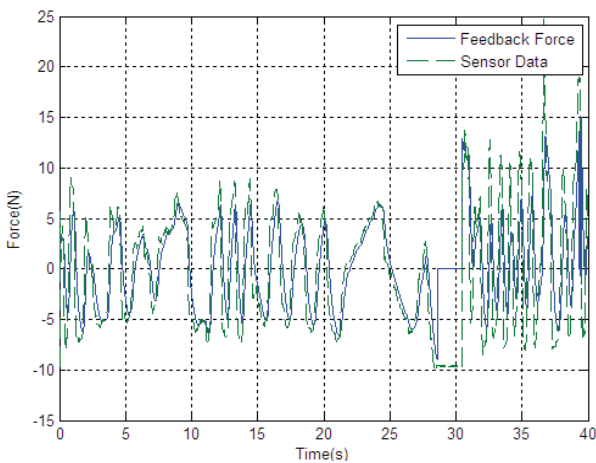
1. 원격제어 실험

힘 추종 실험을 위하여 힘 센서를 로봇 팔의 끝에 장착하였으며, 로봇 팔 끝의 힘을 제어하기 위해 햅틱 장치를 사용함으로써 그림 5의 힘 피드백 시스템을 구현하였다.

사용된 힘센서는 JR3-Force-moment 센서이고, Sensable사의 햅틱장치를 이용한 힘 피드백 제어를 하였다. 햅틱 장치를 이용하여 목표점과 센서값의 차를 햅틱 모듈에 피드백하는 실험을 하였다.



(a) Before tuning.



(b) After tuning.

그림 7. 접촉힘과 햅틱장치의 힘.

Fig. 7. Contact force and sensed force.

그림 7(a)는 햅틱 모듈에 무리를 가하지 않기 위하여 피드백하는 힘을 4배로 줄어 적용하였다. 그림 7(b)는 그 값을 다시 4배한 것이다. 이것은 작업의 용도에 따라 피드백되는 힘의 크기를 조절함으로써 적절한 제어를 가능하게 해 준다. 직접적인 힘을 느끼면서 하는 정밀한 작업의 경우, 힘의 스케일을 똑같이 맞추어서 하고, 그와 다른 경우에는 적절히 조절해서 할 수 있다.

2. 위치기반 임피던스 힘 추종 실험

힘 제어에 있어서 접촉되는 면의 강성도에 따라서 실험에 큰 영향을 미치게 되므로 접촉 구조물 끝을 구형 모양으로 구현하여 외부적인 외란, 즉 마찰을 줄였다. 그림 8과 같이 로봇의 한쪽 팔을 이용하여 실험을 하였고, 제어주기는 100 Hz이다.

로봇의 끝점 초기 위치는 0.44 m이고, 햅틱 장치를 이용하여 목적 위치를 생성하게 된다. Y축 방향으로 증가하는 방향으로 진행하다가 장애물이 있는 0.481m 지점에서는 햅틱장치를 이용한 위치 제어가 아닌, 힘 제어로 전환하여 기준힘이 0N에서 10N으로 바뀌는 것을 확인할 수 있다. 힘 제어를 유지하다가 햅틱장치에 힘을 가하여 Y축 방향의 감소하는 방향으로 움직여서 접촉힘 이하로 힘이 떨어지면, 힘 제어에서 위치제어로 전환하게 되고, 기준힘이 10N에서 0N으로 바뀌게 된다.

힘 제어 실험 결과 그래프에서 그림 9(a)는 특정위치(0.481m)의 장애물과 로봇의 끝점의 위치이다. 로봇의 경로는 햅틱장치에 의해 생성되었다. 그림 9(b)는 기준힘(10N)을 추종한 것이다. 기준힘을 센서로 측정된 힘이 잘 추종하고 있음을 확인할 수 있다.

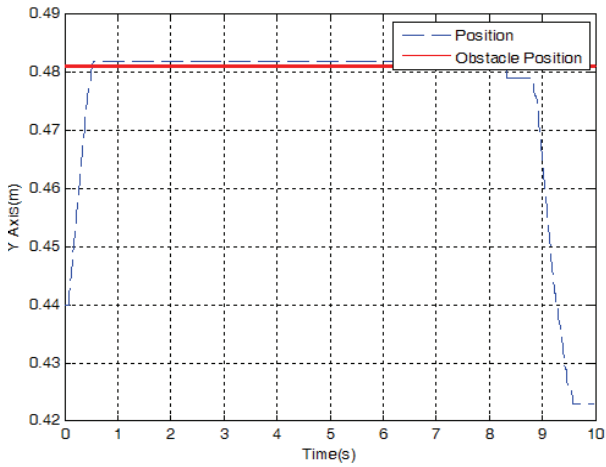
3. 로봇팔과 인간과의 힘 작용 실험

힘 작용 제어 실험은 힘에 의해 생성되는 위치 x_a 를 이용하여 인간의 팔을 로봇 팔이 추종하도록 하는 실험이다. x_a 를 적분한 값과 실제 생성된 로봇 팔의 위치는 누적오차를 가지고 있으며, 로봇 팔이 움직이는 반응성의 한계로 인하여 뒤에 나오는 실험 결과에 x_a 의 누적 결과와 기준 위치는 양상은 비슷하지만, 값의 차이가 나는 것을 확인할 수 있다. 제어되는 순간의 힘에 의해 발생하는 위치 x_a 를 이용하여 로봇 팔이 인간의 팔을 추종하는 것에 집중하였다.

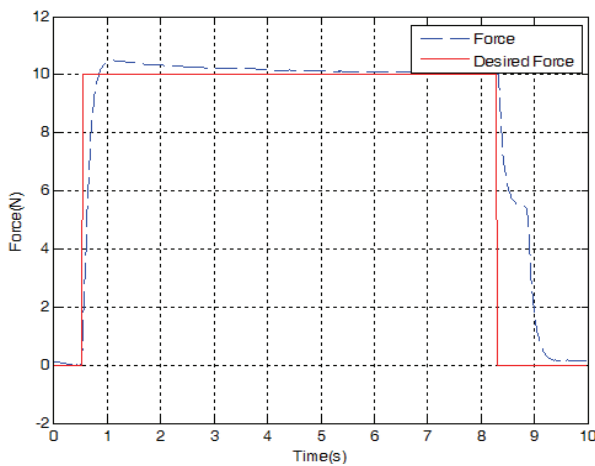


그림 8. 힘 제어 실험 모습.

Fig. 8. Experimental figure with force control.



(a) Y axis.



(b) Force.

그림 9. 위치기반 힘 제어 실험 결과.

Fig. 9. Position-based force control results.

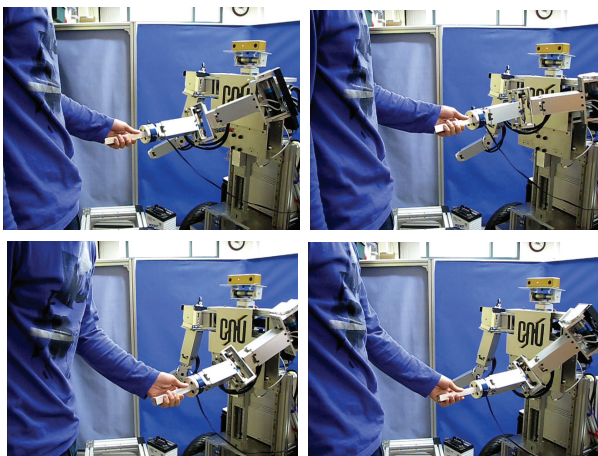
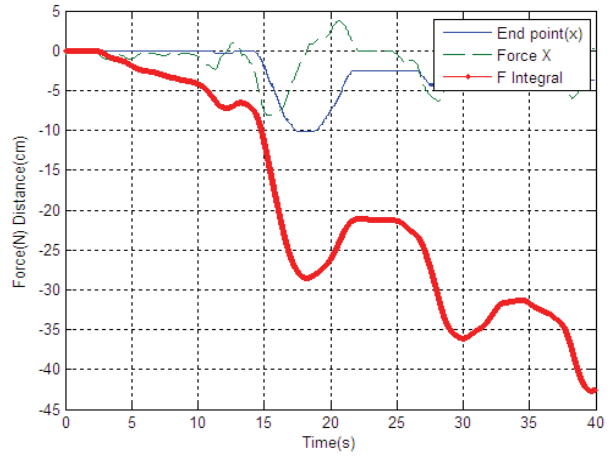


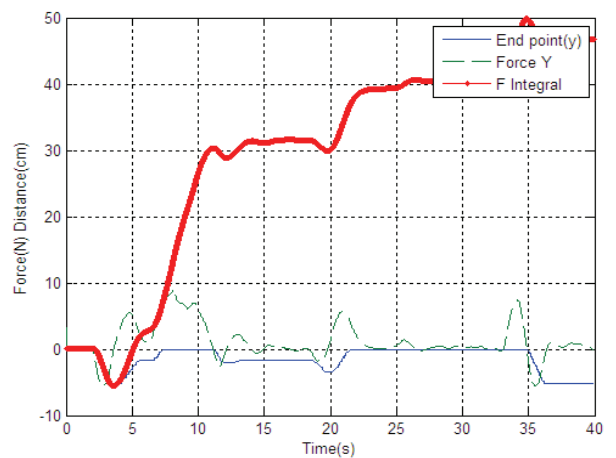
그림 10. 로봇팔과의 힘 작용 실험.

Fig. 10. Experimental figure with manipulator.

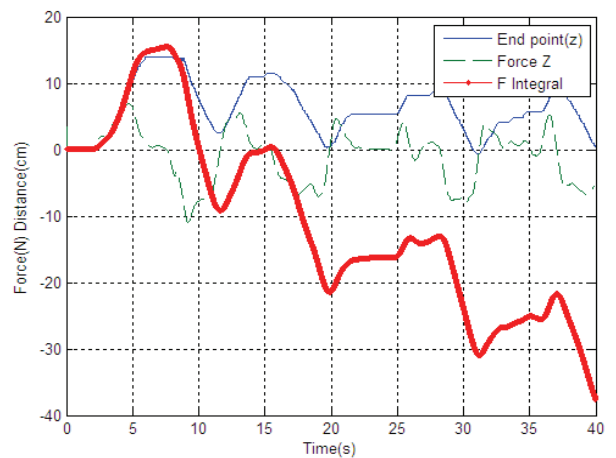
그림 10은 실제로 인간과 로봇이 상호작용하는 것을 보여준다. 인간이 여러 방향으로 로봇을 움직이는 것을 볼 수 있다. 이 경우에 인간이 마스터가 되어 움직임을 발생하면 로봇이 슬레이브가 되어 그 움직임을 따라 한다.



(a) X axis.



(b) Y axis.



(c) Z axis.

그림 11. 로봇 팔의 3축 힘 작용 실험 결과.

Fig. 11. 3 axis force interaction control with robot arm result.

그림 11은 X-Y-Z축의 3축에 관한 힘작용 제어 결과이다. 로봇팔 끝의 좌표의 초기값은 $x = 0(m)$, $y = 0.45(m)$, $z = -0.179(m)$ 이다.

그림 11에서 붉은 선은 힘으로부터 필터된 변경 위치값 x_a 을 나타낸다. 힘의 방향에 따라 로봇 팔의 움직임을 확인할 수 있다. 로봇 팔의 움직임의 특성상 지연을 가지고

추종함을 확인할 수 있었다. 힘의 벡터 좌표와 직교좌표가 같도록 맵핑함으로써 3차원 상에서도 잘 추종할 수 있었다.

4. 이동 로봇팔과 인간과의 힘 작용 실험

그림 12는 로봇 팔 끝의 힘 센서와 사람의 팔의 힘 작용을 이용하여 모바일 로봇의 움직임을 나타내는 실험이다. 모바일 로봇은 4접점 상태로 일반적인 이동로봇의 형태이다. 사용자가 로봇 팔을 밀고 당기는 과정을 반복하여 수행하였다. 사용자가 로봇을 밀면 로봇이 밀리고 당기면 따라오는 것을 확인할 수 있다.

이는 사용자의 주어진 힘에 따른 힘센서값에 따라 이동 로봇의 모터의 토크값이 변화하는 것이다. 센서의 좌표는 항상 글로벌 좌표를 유지할 수 있도록 오리엔테이션을 고정할 수 있는 두 번째 역기구학을 실험에 적용하였으며, 제어주기는 100 Hz이다. 이동로봇은 크게 각도 제어, 위치제어, 회전제어의 3가지 제어가 동작하게 된다. 각 제어기의 이득값은 아래 표 1과 같다.

힘제어의 영향에 따른 위치는 식 (22)의 변수는 다음과 같이 $\alpha = 0.5, \beta = 0.2, \gamma = 0.1$ 로 하여 적용하였다.

그림 13은 힘에 따른 이동로봇의 토크를 나타낸 것으로서, 힘의 크기와 방향이 토크의 크기와 방향과 일치함을 확인할 수 있다. 이동 로봇이 한 축 위에서 움직인다고 가정하면, 이동로봇의 토크와 이동 위치는 비례 관계에 있게 된다. 이를 이용하여 이동로봇의 토크와 힘 센서 값을 이용하여 힘 제어를 적용할 수 있게 된다. 그림 14는 각축에 적용되는 힘을 나타낸다.

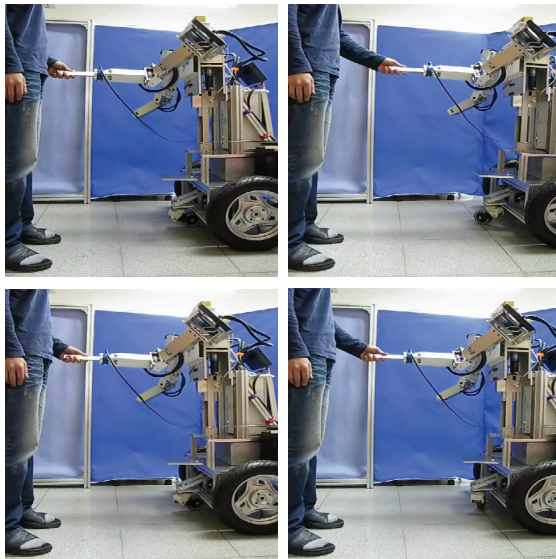


그림 12. 로봇과의 힘 작용 실험.
Fig. 12. Experimental figure with mobile robot.

표 1. 이동로봇 제어 변수.

Table 1. Mobile robot control variable.

	Angle	Position	Direction
K_P	58	45	50
K_I	0	0.1	0.5
K_D	19	9	3

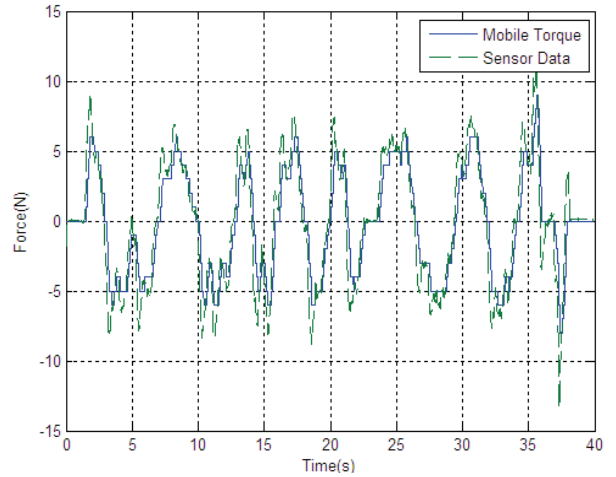


그림 13. 힘 작용 제어 결과.
Fig. 13. Force interaction control result.

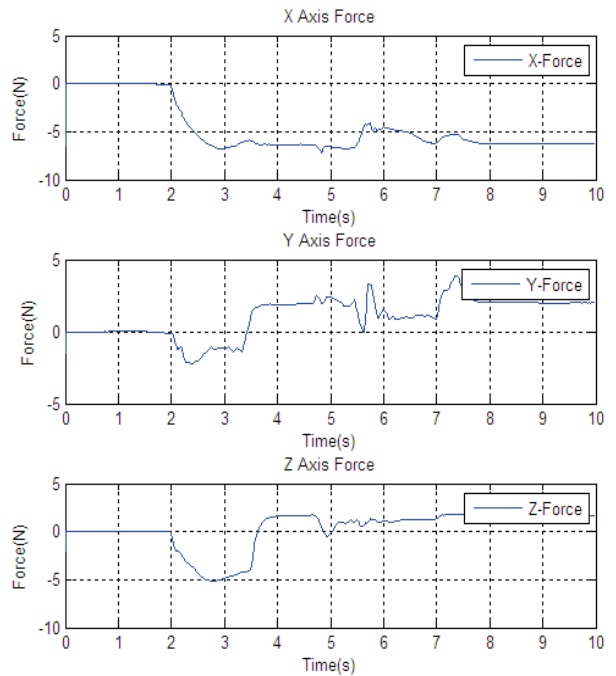


그림 14. 각 축에 대한 힘.
Fig. 14. Force for each axis.

V. 결론

본 논문에서는 이동로봇의 기구학을 이용하여 이동로봇을 제어하였으며, 로봇 팔을 제어하기 위해 기구학과 역기구학을 분석하고 시뮬레이션을 수행하였다. 위치기반의 힘 제어를 구현함으로써 힘 센서와 로봇의 위치만을 이용한 간단한 힘제어 방식을 로봇에 적용하였다. 햅틱 장치를 이용해 힘을 피드백 받는 시스템을 구현하여 힘 제어를 구현함으로써 단순작업이 아닌, 다양한 작업으로의 응용이 가능하였다. 또한 로봇 팔 뿐만 아니라 전체 이동로봇에 힘 제어를 적용하여 인간과의 상호작용을 실험을 통해 살펴보았다.

참고문헌

- [1] Personal robots, "http://willow garage.com
- [2] Twendy-one, "http://twendy-one.com
- [3] HUBO, "http://hubolab.com
- [4] KIBO, "http://irobotics.re.kr
- [5] C. H. Park and K. T. Park, "Design and control of industrial dual arm robot," *Korean Society of Precision Engineering*, vol. 25, no. 11, pp. 58-65, 2008.
- [6] M. S. Choi, S. J. Lim, J. Y. Lee, C. S. Han, "Cooperative path planning for redundant dual-arm robot using low-dimensional sampling-based algorithm," *International Federation of Automatic Control(IFAC)*, 2010.
- [7] J. K. Ahn and S. Jung, "Implementation and control of an extendable and separable mobile robot manipulator for indoor service," *Journal of Institute of Electronics Engineering*, SC, no. 1, pp. 39-46, 2011.
- [8] Segway, "http://segway.com
- [9] H.-J. Lee and S. Jung, "Balancing control of a two wheeled mobile robot system," *Journal of Institute of Electronics Engineering*, SC, no. 6, pp. 468-474, 2011.
- [10] H. W. Jeon and S. Jung "Implementation of an embedded system for an interaction between robot arm and human arm based on force control," *Journal of Institute of Control, Robotics, and Systems (in Korean)*, vol. 15, no. 11, pp. 1096-1101, 2009.
- [11] M. Raibert and J. J. Craig, "Hybrid position and force control of manipulators," *ASME Journal of Dynamics Systems, Measurement, and Control*, pp. 126-133, 1981.
- [12] R. J. Anderson and M. W. Spong, "Hybrid impedance control of robot manipulators," *Proc. of IEEE Conference on Robotics and Automations*, pp. 549-556, 1988.
- [13] S. Jung and T. C. Hsia, "Neural network impedance force control of robot manipulator," *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, vol. 45, no. 3, pp. 451-461, 1998.



안재국

2008년 충남대 메카트로닉스공학과 졸업. 2010년 동 대학원 석사. 현재 LG 디스플레이 연구원. 관심분야는 자동화 시스템, 모바일 매니플레이터의 제어 및 응용, 밸런싱 로봇 시스템 설계 및 제어, 지능 제어 시스템.



정슬

1988년 미국 웨인 주립대 전기 및 컴퓨터 공학과 졸업. 1991년 미국 캘리포니아대 데이비스 전기 및 컴퓨터 공학과 석사. 동 대학 박사. 1997년~현재 충남대학교 메카트로닉스공학과 교수. 관심분야는 지능제어 및 지능로봇 시스템, 장애우를 위한 보행 및 휠체어 로봇 설계 및 개발, 가정용 서비스 로봇 개발, 로봇교육.