

원격제어 시스템의 종로봇인 이동 로봇의 제작과 힘 추종 제어 구현

Implementation of Force Tracking Control of a Slave Mobile Robot for Teleoperation Control System

배 영 겐, 최 호 진, 정 슬*
(Yeong Geol Bae, Ho-Jin Choi, and Seul Jung)

Abstract: In this paper, an implementation of force control for a slave mobile robot in tele-operation environment is presented. A mobile robot is built to have a force control capability with a force sensor and tested for force tracking control performances. Both position and contact force are regulated by a PID based hybrid control method and the impedance force control method. To minimize accumulated errors due to the adaptive impedance force control method, the novel force control method with a weighted function is proposed. Experimental studies of regulating contact forces for different control algorithms are tested and their performances are compared.

Keywords: force control, hybrid control, weighted adaptive impedance force control, mobile robot

I. 서론

원격제어는 최근에 매우 유용하게 사용되는 로봇 기술 중 하나이다. 전쟁지역이나 환경오염으로 인간이 접근하기 어려운 곳에서의 작업은 로봇을 사용하는 정당성을 부여한다. 또한 거리상의 제약으로 접근성이 어려운 환경에서 임무를 수행해야 하는 경우에 로봇의 역할은 매우 중요하다. 이에 원격으로 로봇을 제어하며 수행하는 원격작업이 필요하다.

원격제어는 원자력 연구소에서 꾸준히 발전해 왔고 최근에는 의료로봇 분야에서 매우 유용하게 사용되고 있는 실정이다. 원격제어의 경우 단순히 로봇의 움직임을 조작하는 경우의 단방향 제어와 로봇이 환경과 작업을 통해 받는 힘 정보를 조작자가 같이 느끼는 양방향 제어로 나눌 수 있다.

단 방향 제어의 경우의 예를 살펴보면 대부분 탐사나 정보 수집에 관한 임무를 수행하는 경우이다. 종로봇인 반 자율주행 이동로봇을 주로봇인 조이스틱으로 제어하여 카메라로 정보를 수집하는 예를 들 수 있다. 재해로봇의 경우 협난한 공간에서 로봇이 자율적으로 움직이면 좋지만, 반 자율적으로 조작자가 원격으로 제어하는 것이 작업을 효율적으로 수행할 수도 있다.

하지만 최근에는 단순히 정보를 수집하는 이동로봇을 넘어 종로봇이 작업을 수행하는 세련된 제어 기술을 요구하고 있다. 종로봇이 작업을 수행하기 위해서는 주변의 환경과 접촉을 해야 하는데, 조작자가 종로봇이 작업하는 것을 그대로 느끼면서 종로봇을 제어하면 작업의 정확성이 증대

된다. 그림 1에 제어 방식이 요구되는 양방향 원격제어 기술이 나타나 있다.

힘제어란 많이 알려진 세련된 기술의 하나로 일반적으로 로봇 팔의 힘과 위치를 동시에 제어하는 기술을 말한다[1]. 힘제어의 목적은 설정한 기준 힘을 로봇이 정확하게 추종하는 기술을 말한다. 알려진 힘제어 방식으로는 임피던스 제어방식[2]과 하이브리드 힘제어 방식[3]이 있다. 최근에는 이 두 제어 방식으로부터 변형된 힘제어 방식들이 제안되었다[4-13].

힘제어를 적용하기 전에 먼저 선행되어야 하는 것은 위치제어이다. 위치제어에 오차가 있으면 힘제어에 오차가 발생하기 때문이다. 이를 해결하기 위한 많은 노력이 있었다[7-9].

최근에는 로봇에 대한 연구가 산업로봇에서 서비스로봇으로 이동하면서 이 힘제어 기술을 이동로봇에 적용하는 사례가 늘고 있다[10,11]. 이동로봇의 힘제어를 이용하여 물건을 조작하거나 상호작용을 하는 경우도 있다[14-16].

본 논문에서는 원격제어 환경에 사용할 수 있는 종로봇을 제작하여 힘제어를 적용하여 실험하였다. 이동로봇의 앞에 힘센서를 부착하여 대상체와의 접촉 힘을 감지하도록 하였다. 양방향 원격제어를 수행하기 전에 단방향으로 종로봇인 이동로봇에 힘제어를 적용하여 원격지에서의 작업의

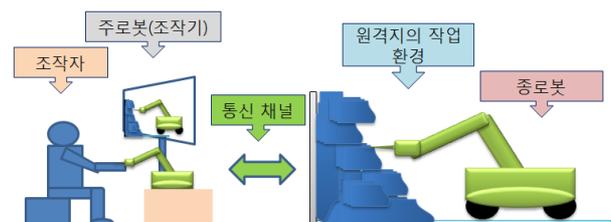


그림 1. 원격제어 시스템 구성.

Fig. 1. Structure of tele-operation system.

* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수: 2009. 12. 18., 수정: 2010. 1. 4., 채택확정: 2010. 4. 22.

배영겐, 최호진, 정슬: 충남대학교 메카트로닉스공학과

(dinoyg@empal.com/qowlcjfja@naver.com/jungs@cnu.ac.kr)

※ 이 논문은 교육과학기술부 특정기초사업과 지식경제부 융복합형 로봇 전문인력양성사업의 지원으로 연구되었으며, 이에 감사드립니다.

성능을 향상하고자 하였다.

중로봇단에 적용하는 힘제어로는 하이브리드 힘제어 방식의 형태와 적응임피던스 방식을 적용하였다. 또한 적응 임피던스 방식의 문제점인 누적오차로 인한 오버슈트를 줄이기 위해 가중치를 도입하여 성능을 검증하였다. 다양한 힘제어 방식을 사용한 실험 결과를 통해 얻어진 힘 추종 결과를 비교 분석하여 보았다.

II. 이동로봇의 기구학 및 동역학

중로봇인 이동로봇은 그림 2에 보여진 것처럼 두 바퀴로 구동되는 로봇이다.

따라서 기구학은 다음과 같다[11]. 조인트공간의 좌표는 자코비안의 관계식을 통해 카테시안 좌표로 표현된다.

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_c \\ \dot{y}_c \\ \dot{\phi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{r_w \cos \phi}{2} & \frac{r_w \cos \phi}{2} \\ \frac{r_w \sin \phi}{2} & \frac{r_w \sin \phi}{2} \\ \frac{r_w}{L} & -\frac{r_w}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta}_r \\ \dot{\theta}_l \end{bmatrix} \quad (1)$$

구속조건을 기준으로 라그랑지안 변수를 소거한 뒤에 나타나는 동역학식은 다음과 같다[11].

$$\begin{aligned} D_{11}\ddot{\theta}_r + D_{12}\ddot{\theta}_l + 2c^3bd(m_T + m_c)(\dot{\theta}_r\dot{\theta}_l - \dot{\theta}_l^2) &= \tau_r \\ D_{21}\ddot{\theta}_r + D_{22}\ddot{\theta}_l + 2c^3bd(m_T + m_c)(\dot{\theta}_r\dot{\theta}_l - \dot{\theta}_r^2) &= \tau_l \end{aligned} \quad (2)$$

여기서 각 관성성분은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} D_{11} &= c^2m_T(b^2 + d^2) + 2c^2d^2m_c + c^2I + I_w \\ D_{12} &= c^2[(m_T(b^2 - d^2) - 2d^2m_c - I)] \\ D_{21} &= c^2[(m_T(b^2 - d^2) - 2d^2m_c - I)] \\ D_{22} &= c^2m_T(b^2 + d^2) + 2c^2d^2m_c + c^2I + I_w \end{aligned}$$

여기서 I_w 는 바퀴의 관성 모멘트, I 는 이동로봇 전체의 관성모멘트, m_T 은 이동 로봇의 전체질량, m_c 는 바퀴를 제외한 카트의 질량, w_c 는 카트의 각속도, 그리고 $b = \frac{L}{2}$, $c = \frac{r_w}{L}$ 이다.

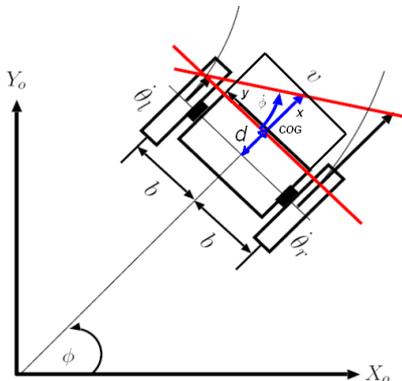


그림 2. 이동로봇의 좌표계.
Fig. 2. Coordinates of mobile robot.

표 1. 각 이동로봇 변수.

Table 1. Parameters of a mobile robot.

$L = 2b$	[m]	차축에서부터 바퀴까지의 길이
d	[m]	무게중심점에서 바퀴중심까지의 거리
v	[m/s]	이동로봇의 선속도
ϕ	[rad]	이동로봇의 조향각
r_w	[m]	바퀴의 반지름
θ_r, θ_l	[rad]	두 바퀴 각각의 회전각
τ_r, τ_l	[Kgm^2/s^2]	두 바퀴 각각의 토크

무게중심이 차축에 있다고 가정하고($d=0$) 로봇이 천천히 움직인다고 가정하면 식 (2)는 간단한 관성시스템이 된다.

III. PID 기반의 하이브리드 힘 제어

하이브리드 힘 제어 방식은 직접 원하는 힘을 추종하도록 추종오차를 줄여가는 방법이다. 따라서 원하는 힘과 실제 힘을 비교해서 오차를 만든 다음 PID 제어를 사용하여 오차를 줄인다. 그림 3은 하이브리드 PID 힘 제어 방식의 블록 다이어그램을 보여준다.

힘센서로부터 센싱된 힘과 기준 힘과 비교해서 PID 제어를 통해 토크로 전달되므로 직접적으로 힘을 제어한다. 본 논문에서는 한 방향의 힘을 제어하므로 각 바퀴에 전달되는 입력은 다음과 같다.

$$u(t) = k_p(f_d - f_e) + k_i \int (f_d - f_e) dt + k_d(\dot{f}_d - \dot{f}_e) \quad (3)$$

여기서 k_p, k_i, k_d 는 제어기 이득값이고, f_d 는 원하는 기준 힘의 값이고 f_e 는 힘센서로부터 측정된 힘의 값이다. 각 바퀴의 토크 값은 다음과 같이 주어진다.

$$\tau = J^T u \quad (4)$$

제어 입력이 힘 추종 오차를 직접 줄여 가므로 초기에 접촉시 발생하는 힘의 오버슈트를 조절하지 못하는 단점이 있어 가능한 천천히 접촉해야 한다.

IV. 적응 임피던스 힘 제어

힘제어에 사용된 임피던스 함수는 다음과 같다. 힘추종이 없는 기본의 임피던스 함수를 힘추종을 할 수 있도록 변형하였다. 하이브리드 방식과의 차이는 위치정보가 있어야 한다는 것이다.

$$f_e - f_d = m\ddot{e} + b\dot{e} + ke \quad (5)$$

여기서 m, b, k 는 임피던스 변수들이고, $e = x_e - x$ 이며

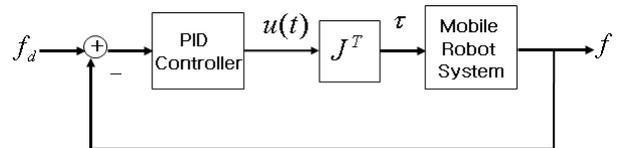


그림 3. 하이브리드 힘제어 블록 다이어그램.
Fig. 3. Hybrid force control block diagram.

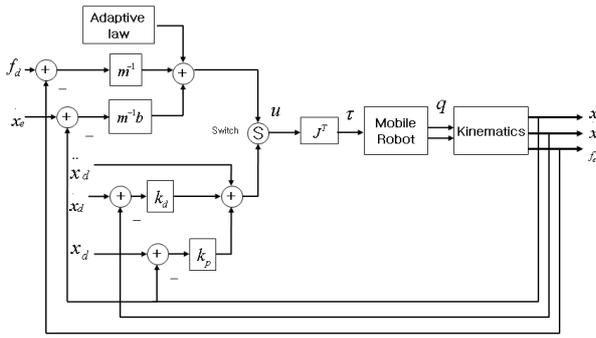


그림 4. 적응 임피던스 힘제어 방식 블록도.
Fig. 4. Adaptive impedance force control block.

x_e 는 대상체의 위치이고 x 는 이동로봇의 위치이다. 위치제어 제어 입력 $u_{position}$ 와 힘제어 방향 제어입력 u_{force} 은 다음과 같다.

$$u_{position} = \ddot{x}_d + k_d \dot{\epsilon} + k_p \epsilon$$

$$u_{force} = \begin{cases} \ddot{x}_e + \frac{1}{m}(f_d + b\dot{\epsilon} + k\epsilon) & \text{Position} \\ \ddot{x}_e + \frac{1}{m}(f_d - f_e + b(\dot{\epsilon} + \Omega)) & \text{Force} \end{cases} \quad (6)$$

Ω : Adaptive law

여기서 k_d, k_p 는 위치 제어기 이득값들이고, $\epsilon = x_d - x$ 이다. 위의 제어입력 $u = [u_{position} \ u_{force}]^T$ 는 로봇이 접촉되지 않은 경우에는 position 제어 법칙을 사용하고 접촉이 되면서 힘이 발생하는 경우에는 force 제어 법칙을 사용함을 나타낸다. 또한 적응 임피던스 제어 알고리즘에 적용된 법칙은 다음과 같다.

$$\Omega(t) = \Omega(t-\lambda) + \eta \frac{(f_d(t-\lambda) - f_e(t-\lambda))}{b}, \quad \eta > 0 \quad (7)$$

η : Update rate, λ : Sampling period

적용법칙은 대상의 강성도나 대상의 위치를 정확하게 모를 경우에 발생하는 힘추종 오차를 보정하는 역할을 한다. 그림 4는 적응임피던스 제어 알고리즘의 제어 블록도이다.

V. 가중치 적용 적응 임피던스 힘 제어

적응 임피던스 힘제어 방식은 적분제어 방식과 유사하다. 적분기를 사용할 경우에 초기 과도응답에 있어 누적 오차에 따른 오버슈트가 발생할 수 있다. 따라서 이러한 누적 오차를 해결하기 위해서는 간단하게 시간을 스위칭하여 누적 오차를 제거하면 되지만 스위칭 시간을 정확하게 알아내는 것이 어렵다. 본 논문에서는 이를 해결하는 방법의 하나로 가중치 방법을 사용하고자 한다. 0에서 1까지의 가중치 함수를 만들어 오차의 누적효과를 최소화하고자 하였다.

아래 가중치 함수는 시그모이드 함수로 0에서 1까지의 값을 나타낸다.

$$W = \frac{1}{(1 + \exp^{\lambda(e_r - k)})} \quad (8)$$

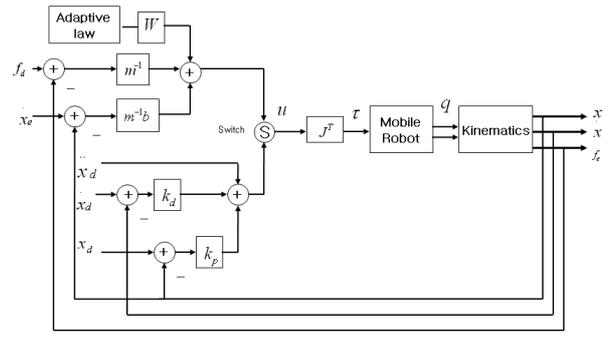


그림 5. 가중치 적용 적응 임피던스 힘제어 방식 블록도.
Fig. 5. Weighted adaptive impedance force control block.

여기서 $e_r = \frac{e_f}{f_d}$ 로 추종을 원하는 힘과 현재 힘의 에러의 비율에 대한 값이고, $e_f = f_d - f_e$ 이다. 또한 λ 는 양의 값으로 설정되며 함수의 기울기를 결정하고 k 값은 함수의 쉬프트로 인한 업데이트 타이밍에 영향을 준다.

힘추종 방향에서 식 (8)을 적용한 적응 임피던스 제어의 새로운 제어 입력은 다음과 같다.

$$V_{force} = \begin{cases} \ddot{x}_e + \frac{1}{m}(f_d + b\dot{\epsilon} + k\epsilon) & \text{Position} \\ \ddot{x}_e + \frac{1}{m}(f_d - f_e + b(\dot{\epsilon} + W\Omega)) & \text{Force} \end{cases} \quad (9)$$

Ω : Adaptive law
 W : Update weight function

VI. 실험

1. 실험환경

실험에 사용한 양방향 원격제어 시스템 전체 구성은 그림 6과 같다.

힘센서는 JR3사의 Force Sensor M-Series 67M25A25-140을 사용하였으며 multimedia timer를 통해 10msec 주기로 데이터를 수집하였다. 카메라는 Pointgray사의 FL2-03S2C-C를 사용하였으며 image grab을 작업자 쓰레드로 설정하였다. 그리고 통신채널 상에서 발생하는 일정한 시간간격을 다중 배열과 시프트 연산자를 사용하여 생성하였다.

2. 종로봇 시스템

실제 종로봇 시스템은 그림 7과 같이 구현하였다. 종로봇 시스템인 이동 로봇은 두 바퀴의 모바일 기반의 시스템이며, 종로봇 시스템 제어를 위한 제어회로부와 접촉힘 측

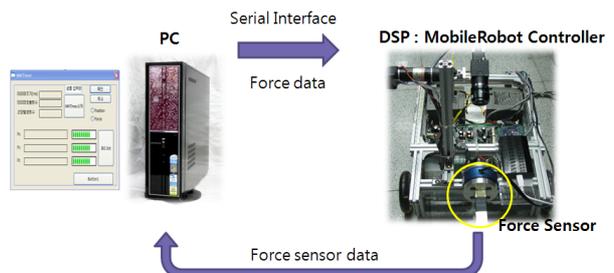


그림 6. 전체시스템.
Fig. 6. Overall system.

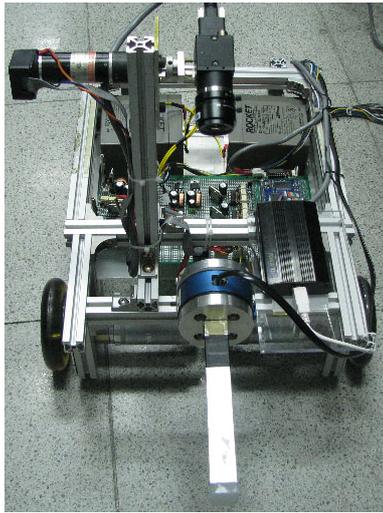


그림 7. 종로봇인 이동로봇.
Fig. 7. Slave robot.

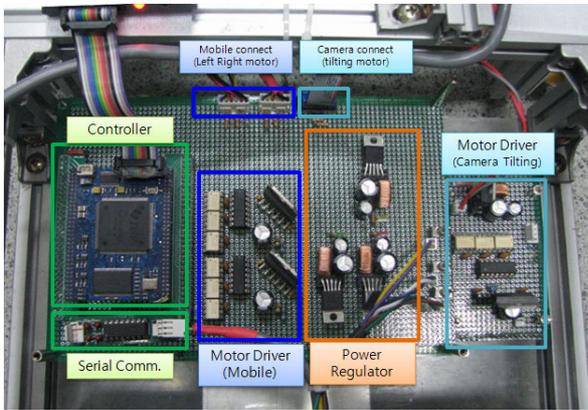


그림 8. 종로봇 시스템의 제어 회로부.
Fig. 8. Control hardware of the slave robot.

정을 위한 힘 센서 모듈과 영상 이미지 획득을 위한 카메라 모듈로 구성되어 있다.

종로봇 시스템 제어를 위한 제어 회로부는 그림 8과 같이 구성하였다.

메인 제어기로 TI사의 DSP TMS320F2812를 사용하였다. DSP C28xx 제품군의 281x계열은 PWM, 엔코더 카운터, SPI, SCI, CAN 통신, A/D 변환기, 다양한 인터럽트들을 내부에 장착 주변회로를 제공하며, 150MMIPS의 비교적 빠른 코어 연산속도와 36K RAM과 256KB Flash 메모리 용량을 제공하여 모터 제어에 많이 사용된다. 본 논문의 위치제어에 필요한 엔코더 카운터는 Event Manager Module의 QEP sub module를 사용하여 2개의 DC 모터의 현재 위치 값을 초기 시작위치에서 이동로봇이 이동한 상대적인 위치를 누적하여 계산한다. 주로봇 시스템과의 통신을 위해서 SCI 모듈을 사용하였고, 10msec의 제어를 DSP CPU Timer0를 통해서 설정하였다.

모터 드라이버는 LMD18200을 사용하여 구성하였다. LMD18200은 내부에 보호회로가 추가되어 있어 모터에서 발생하는 역기전력에 의한 제어기 손상을 방지할 수 있는

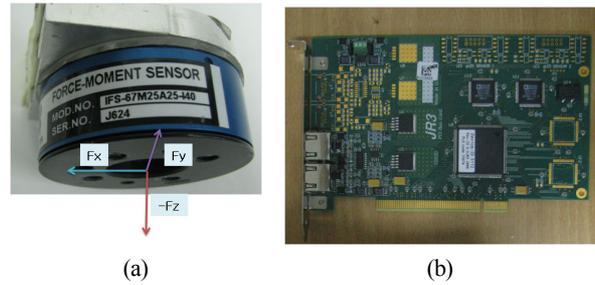


그림 9. (a) 힘센서 (b) 데이터 수집보드.
Fig. 9. (a) Force sensor (b) Data acquisition board.

며, 최대 55V의 내압 전압 값을 가지며 최대 3A(Peak6A)의 전류를 내보낼 수 있다. 또한 제어기와 모터 드라이버 사이의 데이터 교환은 포토커플러인 TLP250을 사용하여 절연하였으며 슈미트 트리거를 사용하여 신호의 전압레벨을 안정화 하였다.

3. 힘센서

종로봇과 작업 대상체 사이의 접촉힘을 측정하기 위한 힘 센서 모듈은 크게 힘 센서와 데이터 수집 보드로 이루어진다. 본 논문에서 사용한 힘 센서는 그림 9의 JR3사의 Force Sensor M-Series 67M25A25-140을 사용하였다. 이 센서는 6축 힘센서로 8Khz의 data rate를 가지면 힘의 측정 범위로 최대 Fx와 Fy로 100N, Fz로 200N의 힘 측정이 가능하다.

VII. 실험 결과

1. 접촉된 상태에서의 힘제어

1.1 실험환경

직접 힘제어의 경우, 작업 대상체와 접촉시 발생하는 충격력으로 인하여 제어가 어렵기 때문에, 1N의 힘을 기본 옵션으로 설정하여 기준 입력을 사인파로 인가하였다. 또한 사용한 힘 센서의 경우 노이즈가 심한 특성을 가진다. 따라서 센서 측정값의 소수점 한 자리만을 사용하여, IIR 필터링하여 사용하였다. 그림 10은 접촉한 상태에서 힘제어를 수행하는 실험 환경을 보여준다.

1.2 PD 제어

먼저 간단한 PD 방식의 하이브리드 제어방식을 실험하였다. 그림 11은 PD 제어를 적용하여 실험한 결과를 원하는 힘과 실제 힘을 비교하여 나타낸 그래프이다. 전체적

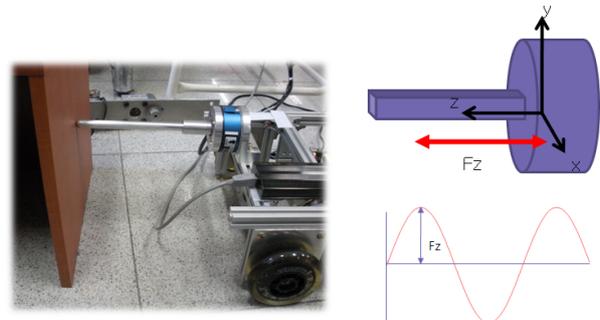


그림 10. 접촉된 상태에서의 실험 환경.
Fig. 10. Experimental setup of on contact task.

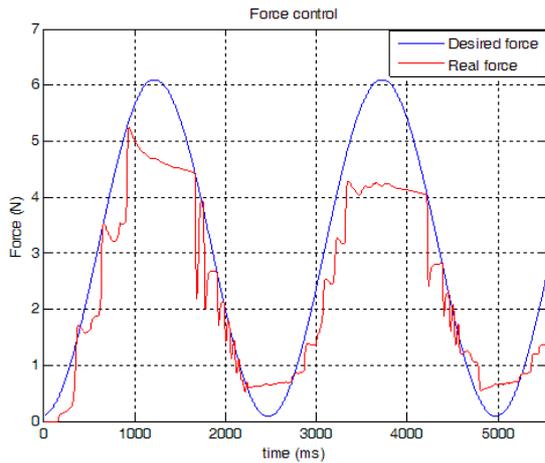


그림 11. PD 제어의 힘추종 결과.
Fig. 11. PD force tracking result.

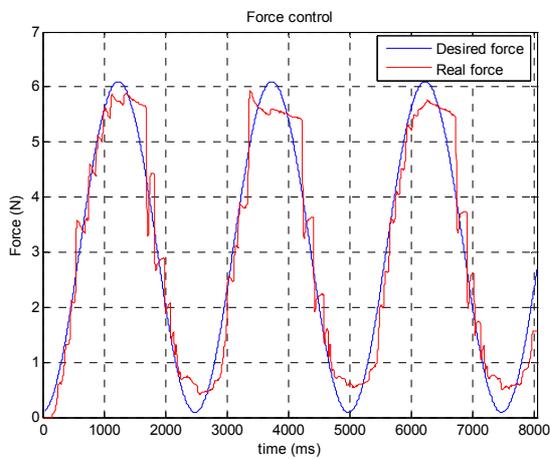


그림 12. PID 제어의 힘추종 결과.
Fig. 12. PID force tracking result.

으로 원하는 힘을 추종하는 경향은 보이지만 oscillation이 지속적으로 일어나며 힘의 증감의 기울기가 작은 구간에서는 제어가 이루어 지지 않는 현상도 보이고 있다. 결국 불안정한 현상을 발생하지 않았지만 힘 추종 오차가 크게 나타난 것을 볼 수 있다.

1.3 PID 제어

다음은 추종 오차를 줄이기 위해 PID 기반의 하이브리드 제어 방식을 사용하여 실험하였다. 그림 12는 PID 제어를 적용한 실험 결과를 원하는 힘과 실제 힘으로 비교하여 나타낸 그래프이다. 전체적으로 원하는 힘을 추종하고 있다. PD 제어기에서 문제가 되었던 힘의 증감의 기울기가 작은 구간에서도 제어가 원활하게 되고 있음을 볼 수 있다.

2. 접촉하지 않은 상태에서의 힘제어

2.1 실험환경

다음 실험으로는 자유공간에서 구속공간으로의 변환이 발생하는 실험을 수행하였다. 로봇이 대상체와 떨어진 상태에서 위치제어로 움직이면서 접촉을 하여 힘제어로 변환하는 실험을 수행하였다.

그림 13은 모바일 로봇과 접촉될 환경 사이에 일정한 거

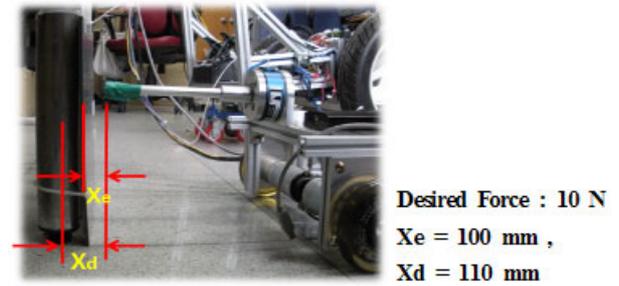


그림 13. 접촉되지 않은 상태에서의 실험 환경.
Fig. 13. Experimental setup of off contact task.

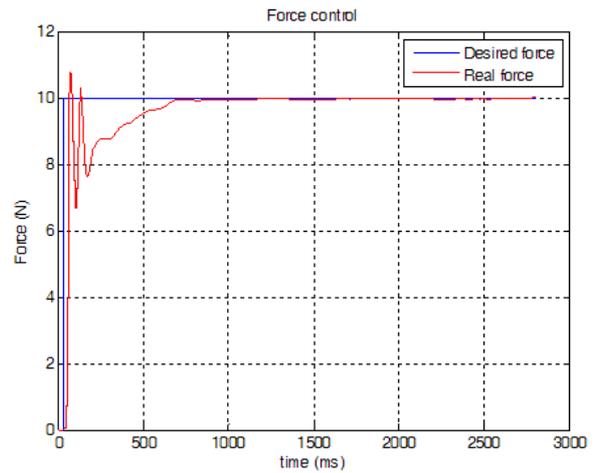


그림 14. 하이브리드 제어 방식의 힘추종 결과.
Fig. 14. Hybrid force control tracking result.

리를 가진 조건의 실험 환경을 나타낸다. 이 조건에서의 실험은 로봇이 접촉될 환경으로 이동하기 위한 위치 제어와 원하는 힘의 추종을 위한 힘 제어가 동시에 이루어져야 한다. 비접촉 환경의 실험 조건은 추종 힘은 10N, 로봇과 환경 사이의 거리는 100mm 이다.

2.2 Hybrid Control

그림 14는 하이브리드 힘 제어를 적용한 실험 결과를 원하는 힘과 비교하여 나타낸 그래프이다. 접촉 후 원하는 힘을 추종하는 제어 성능은 매우 좋은 결과를 보이고 있다. 하지만 접촉하는 순간에 과도 응답을 보이고 있어 실험 조건 및 환경에 따라 제어가 불안정할 수 있는 가능성이 있음을 보이고 있다.

실험 결과를 살펴보면 직접 힘 제어 방식의 경우 원하는 힘을 직접 설정할 수 있어 제어기의 구조가 명확하다는 장점을 가지지만, 작업대상과 접촉시 로봇과 작업대상체 사이의 동적 관계를 고려하지 못하기 때문에 충격 힘이 나타나 제어하기 어렵다는 것을 알 수 있다.

2.3 적응 임피던스 방식

임피던스 제어방식은 힘추종에 취약한 면이 있다. 대상체의 강성도와 위치 오차 같은 불확실성이 힘추종에 영향을 준다. 적응 임피던스 제어 방식은 이러한 문제점을 해결하였기 때문에 정확한 힘추종을 할 수 있다.

그림 15는 적응 임피던스 힘 제어를 적용한 실험 결과

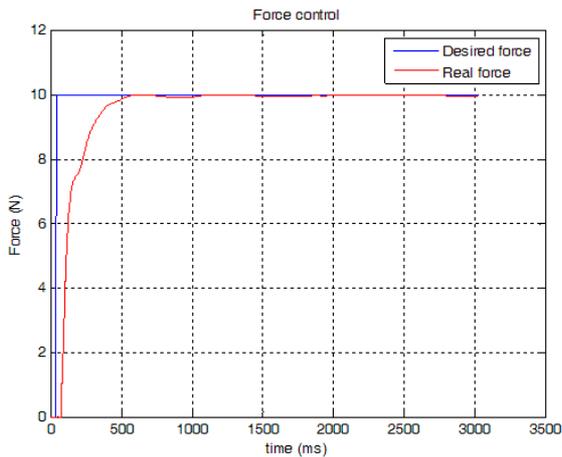


그림 15. 적응 임피던스 방식의 힘추종 결과.

Fig. 15. Adaptive impedance force tracking result.

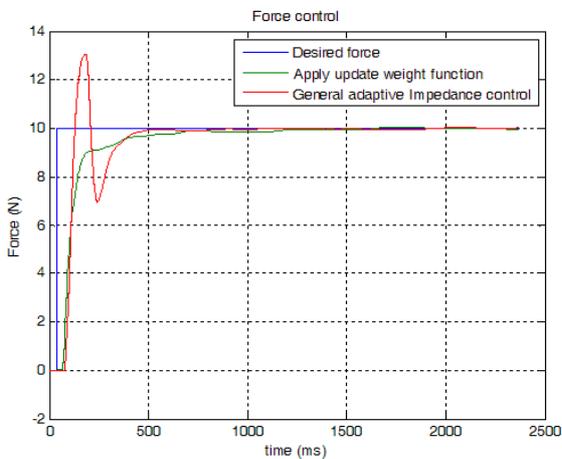


그림 16. 가중치적용 적응 임피던스 방식의 힘추종 결과.

Fig. 16. Weighted adaptive impedance force tracking result.

를 나타낸 그래프이다. 접촉하는 순간에 과도 응답이 전혀 없이 힘 제어에서 추구하는 오버 댐프 성격의 응답 성능을 보여 주고 있으며 접촉 후에는 임피던스 제어기에서 추종하지 못했던 힘의 값이 업데이트 룰의 영향으로 원하는 힘을 추종하는 것을 확인할 수 있다.

2.4 가중치 적용 적응 임피던스 방식

그림 16에 적응 힘제어 방식과 가중치를 적용한 적응 힘제어 방식의 결과가 나타나 있다. 적응 힘제어 방식의 경우에 오버슈트가 발생하는데 가중치를 적용하므로 오버슈트를 현저하게 줄일 수 있다. 본 논문에서는 $\lambda=2$, $k=10$ 을 사용하였다.

VIII. 결론

본 논문에서는 햅틱 장치를 주로봇으로 하고 이동로봇을 종로봇으로 하는 원격제어 시스템의 환경에서 종로봇의 힘제어를 구현하였다. 원격제어 종로봇단 제어에 PID 형태의 하이브리드와 적응 임피던스 방식의 힘제어기를 사용하여 접촉힘을 제어 하였다. 간단한 한 축 제어를 통해 종로봇이 주어진 힘의 경로를 잘 추종하는 것을 실험적으로 확인할

수 있었다. 직접 힘을 제어하므로 간단하지만 초기에 오버 슈트가 발생하는 하이브리드 방식과 힘추종 오차를 적응방식으로 줄여가는 임피던스 방식의 장단점을 살펴볼 수 있었다. 또한 가중치를 적용하여 힘제어의 누적오차를 줄이는 제어 방법을 실험적으로 검증하였다. 추후과제로 햅틱 기반의 양방향 원격제어를 구현하여 실제 작업을 구현하는 것이다.

참고문헌

- [1] J. K. Salisbury, "Active stiffness control of manipulator in Cartesian coordinates," *Proc. of IEEE Conference on Decision and Control*, pp. 95-100, 1980.
- [2] N. Hogan, "Impedance control: An approach to manipulator, part i,ii,iii," *ASME journal of Dynamic Systems, measurement, and Control*, vol. 3, pp. 1-24, 1985.
- [3] M. Raibert and J. J. Craig, "Hybrid position and force control of manipulators," *ASME journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, pp. 126-133, 1981.
- [4] 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.
- [5] T. Lasky and T. C. Hsia, "On force tracking impedance control of robot manipulators," *Proc. of IEEE Conference on Robotics and Automations*, pp. 274-280, 1991.
- [6] S. H. Lee and H. S. Lee, "Intelligent control of manipulators interfacing with an uncertain environment based on generalized impedance," *Proc. of IEEE Symposium on Intelligent Control*, pp. 61-66, 1991.
- [7] S. Jung and T. C. Hsia, "Neural network impedance force control of robot manipulators," *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, vol. 45, no. 3, pp. 451-461, 1998.
- [8] S. Jung and T. C. Hsia, "Robust neural force control scheme under uncertainties in robot dynamics and unknown environment," *IEEE Transaction on Industrial Electronics*, vol. 47, no. 2, pp. 403-412, 2000.
- [9] 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. 20, no. 9, pp. 765-774, 2001.
- [10] S. Jung, P. W. Jeon, and T. C. Hsia, "Contour tracking of an unknown planar object by regulating force for mobile robot navigation," *ROBOTICA*, vol. 25, no. 3, pp. 297-305, 2007.
- [11] 정슬, 장평수, 원문철, 홍섭, "신경회로망을 이용한 비전 기반 로봇의 위치제어에 대한 실험적 연구," 제어·자동화·시스템공학 논문지, 제9권 제7호, pp. 515-526, 2003.
- [12] T. Yoshikawa, "Dynamic hybrid position/force control of robot manipulators-description of hand constraints and

calculation of joint driving force," *IEEE Journal of Robotics and Automation*, vol. RA-3, no. 5, pp. 386-392, October 1987.

- [13] J. Roy and L. L. Whitcomb, "Adaptive force control of position/velocity controlled robots: theory and experiment," *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, vol. 18, no. 2, pp. 121-137, 2002.
- [14] Z. D. Wang, Y. Hirata, and K. Kosuge, "Impedance-based motion control of passive-type robot porter for handling an object," *IEEE International Conference on*

Robotics and Biomimetics, pp. 709-714, 2006.

- [15] H. J. Lee and S. Jung, "Guidance control of a wheeled mobile robot with human interaction based on force control," *International Journal of Control, Automation, and Systems Engineering*, vol. 8, no. 2, pp. 361-368, 2010.
- [16] 전효원, 정슬, "힘제어 기반의 로봇 팔과 인간팔의 상호 작용을 위한 임베디드 시스템 설계," 제어·로봇·시스템학회 논문지, 제15권 제11호, pp. 1096-1101, 2009.



배영걸

2004년 충남대 메카트로닉스공학과 졸업. 2006년 동 대학원 석사졸업. 2009년~현재 충남대 메카트로닉스공학과 박사과정. 관심분야는 가정용 로봇, 힘 제어 응용.



최호진

2007년 충남대 메카트로닉스공학과 졸업. 2009년 충남대 메카트로닉스 지능로봇 전공 대학원 석사 졸업. 현재 LG 이노텍 연구원. 관심분야는 모터제어, 신호처리, 제어 및 임베디드 프로그래밍.



정슬

1988년 미국 웨인 주립대 전기 및 컴퓨터공학과 졸업. 1991년 미국 캘리포니아대 데이비스 전기 및 컴퓨터 공학과 석사. 동 대학 박사. 1997년~현재 충남대학교 메카트로닉스공학과 교수. 관심분야는 지능 제어 시스템 및 지능로봇 시스템, 인간 중심의 로봇 및 메카트로닉스 시스템, 다양한 밸런싱 메커니즘의 제어 및 응용.