

# 자율 주행 이동 로봇의 슬립을 고려한 횡방향 임피던스 힘제어에 대한 연구

## Studies of Lateral Impedance Force Control for an Autonomous Mobile Robot with Slip

정 슬\*, 하 천 장  
(Seul Jung and T. C. Hsia)

**Abstract :** In this paper, lateral force control of a mobile robot with slip is presented. First, the bicycle model of a mobile robot is derived for the front steering. Second, impedance force control algorithm is applied to regulate contact force with environment. The desired distance is specified conservatively inside the environment to guarantee to make contact. Different stiffness of environment has been tested for force tracking task. Simulation results show that the proposed control algorithm works well to maintain desired contact force on the environment.

**Keywords :** lateral control, impedance force control, mobile robot

### I. 서론

힘제어는 로봇이 대상체와 함께 협조작업을 할 경우에 일반 산업 로봇에 적용되는 반드시 필요한 제어 기술이다. 이 기술은 크게 두 가지로 나눌 수 있는데, 하나는 임피던스 힘제어 방식이고 다른 하나는 하이브리드 힘제어 방식이다[1,2]. 임피던스 방식은 로봇과 대상체간의 동적인 관계를 고려하여 힘을 제어하는 방식이고 하이브리드 방식은 직접 힘의 오차를 제어하는 방식이다. 본 논문에서는 임피던스 힘제어 방식을 이동로봇의 장애물 작업에 사용하고자 한다. 이동로봇의 힘제어 적용은 그 사례가 드물고 이에 대한 연구가 많이 되어있지 않은 분야이다. 이처럼 이동로봇의 힘제어의 연구가 미약한 것은 그 실례가 많지 않기 때문이다. 하지만 오늘날에는 많은 부분을 자동화하는 과정에서 이동로봇이 많이 쓰이게 되고 그에 따른 힘제어의 적용사례가 점차 늘어나고 있다. 예를 들어, 산업분야에서 살펴보면 이동로봇을 사용하여 페인트 칠을 한다거나 용접 또는 다른 대상체와의 접촉에 의해 이루어지는 작업을 하는 경우들이 있다. 이 경우에 로봇은 일정한 힘을 대상체에 적용함으로써 성공적인 작업을 수행할 수 있게 된다. 또한 최근에는 도로보수 로봇분야에서 노면과의 일정한 힘을 유지하기 위한 힘제어를 사용하여 적용한 사례가 있다[3,4]. 더욱이 인간과 함께 상호 작용하는 서비스 로봇분야에서는 이동로봇의 힘제어 기술이 필요하다. 인간이 로봇을 이끌고 간단든지 물건을 들고 작업을 한다든지 하는 등의 공동작업에서는 힘제어가 반드시 필요하다[5,6].

본 논문에서는 이동로봇이 대상체로부터 일정한 힘을 유지하며 움직이도록 하기 위해 횡방향으로의 힘을 제어하고자 한다. 종방향으로는 일정한 속도로 움직인다고 가정하고 횡방향의 힘을 임피던스 힘제어 방식을 사용하여 제어하고자 한다. 임피던스 힘제어의 이점은 로봇과 대상체 간의 역

학적인 임피던스 관계를 고려하므로 동적인 움직임을 잘 표현할 수 있는 것이다.

우선 이동로봇의 바이시클 모델을 근거로 하여 제어 알고리즘을 설계한다. 기존의 이동로봇의 역학은 타이어의 강성도를 고려하지 않고 슬립이 없는 완벽한 구름을 가정으로 실험한 경우가 대부분이다[7-9]. 하지만 이동로봇의 크기가 커지면서 노면과의 접촉을 부드럽게 하기 위해 공기 타이어를 사용하는 경우가 대부분이며, 이 경우에 바퀴의 미끄러짐에 의한 슬립각도가 매우 중요하며 이를 고려해야 한다[10-17]. 특히 힘제어의 경우 대상체로부터의 힘에 로봇이 미끄러지는 경향이 있어 이러한 특성을 잘 나타내기 위해서는 슬립각을 고려하는 것이 좋다. 본 논문에서는 앞 바퀴에 의해 조향되는 이동로봇을 고려하여 시뮬레이션을 통해 제안하는 힘제어 알고리즘의 타당성을 검증하고자 한다.

### II. 이동로봇의 바이시클 모델의 동역학

차량 형태의 이동 로봇의 경우에 앞쪽 좌우 측의 바퀴의 강성도가 같고 뒤쪽의 좌우 바퀴의 강성도가 같으므로 앞쪽에 바퀴 하나 뒤쪽에 바퀴 하나로 모델되는 바이시클 모델 기반의 동역학식으로 간단하게 표현할 수 있다. 그림 1은 이동로봇의 바이시클 모델을 나타낸다. 뒤 바퀴는 앞 바퀴의 조향에 의해 움직인다.

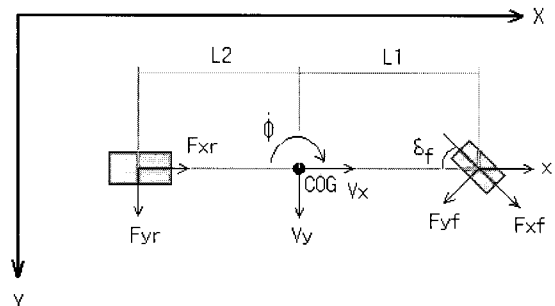


그림 1. 자율 주행 로봇의 바이시클 모델.  
Fig. 1. Bicycle model of a mobile robot.

\* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수 : 2004. 7. 29., 채택확정 : 2005. 9. 1.

정슬 : 충남대학교 메카트로닉스공학과(jungs@cnu.ac.kr)

하천장 : 캘리포니아대학교 전기컴퓨터공학부(hsia@ece.ucdavis.edu)

로봇이 평면에서 움직인다고 가정하면 이동로봇의 동역학 방정식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} X\text{축} : m(\dot{V}_x - V_y \dot{\phi}) &= F_{xf} \cos \delta_f + F_{xr} - F_{yf} \sin \delta_f \\ Y\text{축} : m(\dot{V}_y + V_x \dot{\phi}) &= F_{yr} + F_{yf} \cos \delta_f + F_{xf} \sin \delta_f \quad (1) \\ Z\text{축} : I_z \dot{\phi} &= L_1 F_{yf} \cos \delta_f - L_2 F_{yr} + L_1 F_{xf} \sin \delta_f \end{aligned}$$

여기서  $m$  은 로봇의 질량이고,  $\phi$  는 yaw 각도이고,  $L_1$  은 로봇의 앞바퀴 중심에서 무게중심까지의 거리이고,  $L_2$  는 뒤바퀴 중심에서 무게중심까지의 거리,  $V_x$  는 x축 방향의 속도,  $V_y$  는 y축 방향의 속도,  $F_{xf}$  는 앞바퀴의 x축 종방향 힘,  $F_{xr}$  는 뒤바퀴의 x축 종방향 힘,  $F_{yf}$  는 앞바퀴의 y축 횡방향 힘,  $F_{yr}$  는 뒤바퀴의 y축 횡방향 힘,  $I_z$  는 z 방향의 yaw 모멘트,  $\delta_f$  는 앞바퀴의 조향각,  $\alpha_f$  는 앞바퀴의 슬립 각도, 그리고  $\alpha_r$  는 뒤바퀴의 슬립각도이다.

아래 그림 2에는 슬립 각도를 고려한 구조를 보여준다. 슬립 각도는 다음과 같이 정의된다.

$$\alpha_f = \delta_f - \frac{L_1 \dot{\phi} + V_y}{V_x}, \quad \alpha_r = \frac{L_2 \dot{\phi} - V_y}{V_x} \quad (2)$$

횡방향 힘은 바퀴가 두개인 것을 고려하여 다음과 같이 정의된다.

$$F_{yf} = 2C_{\alpha f} \alpha_f, \quad F_{yr} = 2C_{\alpha r} \alpha_r \quad (3)$$

여기서  $C_{\alpha f}$  과  $C_{\alpha r}$  는 코너 강성도 이다.  $\omega = \dot{\phi}$  라 하고 방정식을 합하면 다음과 같은 식을 얻는다.

$$\begin{aligned} m\dot{V}_y + (mV_x + a_1)\omega + a_2V_y &= 2C_{\alpha f}\delta_f \\ I_z\dot{\omega} + a_3\omega + a_1V_y &= 2L_1C_{\alpha f}\delta_f \end{aligned} \quad (4)$$

여기서

$$a_1 = \frac{2L_1C_{\alpha f} - 2L_2C_{\alpha r}}{V_x}, \quad a_2 = \frac{2C_{\alpha f} + 2C_{\alpha r}}{V_x}, \quad a_3 = \frac{2L_1^2C_{\alpha f} + 2L_2^2C_{\alpha r}}{V_x}$$

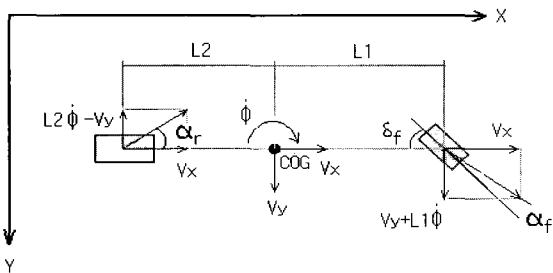


그림 2. 슬립 각도의 구성.  
Fig. 2. Slip angle model.

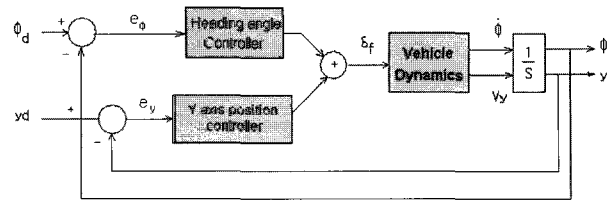


그림 3. 이동로봇의 횡방향 위치제어 블록.  
Fig. 3. Lateral control of a mobile robot.

이를 상태공간 모델로 나타내면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_y \\ \dot{\omega} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{a_2}{m} & -(V_x + \frac{a_1}{m}) \\ -\frac{a_1}{I_z} & -\frac{a_3}{I_z} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_y \\ \omega \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{2C_{\alpha f}}{m} \\ \frac{2L_1C_{\alpha f}}{I_z} \end{bmatrix} \delta_f \quad (5)$$

### III. 횡방향의 위치 제어

아래 그림은 횡방향의 위치 제어 블록 다이어그램을 보여준다. 제어 입력은 조향각  $\delta_f$  이고 출력은 횡방향 속도  $V_y$  와 yaw 각속도  $\dot{\phi}$  가 된다. 이를 미분하면 로봇의 위치 ( $\phi, y$ )를 구하게 되며 이를 제어기로 제어하여 원하는 위치 제어를 하게 된다. 여기에서 위치제어로 각각 PD 제어기를 사용한다.

$$\begin{aligned} u_y &= k_{dy} \dot{e}_y + k_{py} e_y \\ u_\phi &= k_{d\phi} \dot{e}_\phi + k_{p\phi} e_\phi \end{aligned} \quad (6)$$

여기서  $e_y = y_d - y$ ,  $e_\phi = \phi_d - \phi$ . 제어입력은 다음과 같다.

$$\delta_f = u_y + u_\phi \quad (7)$$

### IV. 임피던스 힘제어

임피던스 힘제어란 로봇이 대상과 접촉으로 인한 작업을 할 경우에 필요한 제어 알고리즘의 하나로 로봇과 대상간의 동적인 관계를 고려하여 적용하는 힘을 제어하는 기술이다. 본 논문에서는 이 알고리즘을 이동 로봇에 적용하여 접촉 힘을 제어하고자 한다. 예를 들어 로봇이 벽에 일정한 힘을 주고 움직이는 경우를 살펴보자. 슬립각도를 고려하여 로봇의 동적인 움직임을 고려하여 횡방향의 움직임을 제어하고자 한다. 이 경우에 힘제어 알고리즘을 적용하면 동적인 응답을 얻을 수 있고 외란에 강건하게 된다.

임피던스 힘제어 블록 다이어그램이 그림에 나타나 있다. 이동 로봇이 위치 제어로 움직이다가 대상체를 만나게 되면 힘제어로 스위칭하게 된다. 여기서 대상체의 위치는 실제 대상체의 위치 안쪽에 설정되어 움직이게 제어된다. 대상체 위치  $y_e$  는 실제 로봇이 움직이는 위치  $y$  와 함께 반항 힘을 만든다. 따라서 생성된 힘은 다음과 같이 정의된다.

$$\begin{aligned}
 f_e &= k_e(y - y_e) & y > y_e \\
 f_e &= 0 & y \leq y_e
 \end{aligned}
 \tag{8}$$

일반적인 임피던스 식은 다음과 같다.

$$f_e = m\ddot{e} + b\dot{e} + k_e e \tag{9}$$

여기서  $e = y_d - y$ 이며,  $y_d$ 는 로봇이 추종하고자 하는 경로이고,  $m, b, k$ 는 각각 관성 이득, 댐핑 이득, 강성도 이득값을 나타낸다. 임피던스 함수를 다스 바꾸면 다음과 같은 새로운 원하는 힘을 추종할 수 있는 임피던스 함수를 만들 수 있다.

$$f_e - f_d = m\ddot{\varepsilon} + b\dot{\varepsilon} \tag{10}$$

여기서  $\varepsilon = y_e - y$ 이며  $f_d$ 는 원하는 힘을 나타낸다.

$$u = \ddot{y}_e + \frac{1}{m}(b\dot{\varepsilon} + f_d - f_e) \tag{11}$$

여기서  $y_e$ 가 상수로 정의되므로  $\ddot{y}_e$ 는 영이 된다. 또한  $y_e$ 의 정확한 값을 알지 못하므로 불확실성이 포함된  $y_e'$ 이 사용된다. 이  $y_e'$ 값은 대상체의 위치보다 안쪽으로 설정하여 로봇이 대상체와 접촉을 가능하게 해야 한다. 이 값에 따른 힘의 응답 또한 달라지게 된다.

간단히 하기 위해 모터로 구동되는 steering 시스템을 무시하면 (7)에서처럼 제어입력이 steering 각도가 된다. 따라서, 임피던스 제어 법칙을 위치 제어 법칙과 함께 사용하여 제어 입력으로 steering 각도가 되도록 설정하였다. 아래 그림은 이러한 임피던스 힘제어 방식의 블록 다이어그램을 나타낸다. 위치제어 블록과 힘제어 블록이 모두 나타나 있으며, 횡방향의 경우 위치제어블록에서 힘제어 블록으로 스위칭되는 것을 알 수 있다.

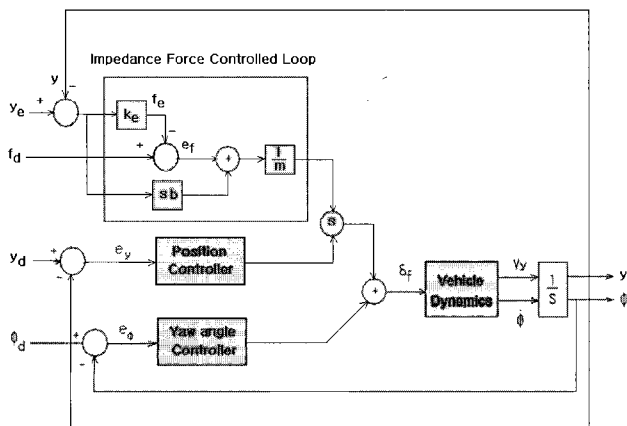


그림 4. 임피던스 힘제어의 블록 다이어그램.  
Fig. 4. Impedance control block diagram.

V. 시뮬레이션 연구

아래 그림은 시뮬레이션 모델의 이동로봇을 보여준다. 타이어 바퀴를 장착하고 있어 야외에서 움직이며 슬립이 발생한다. 뒷바퀴에 의해 구동되고 앞 바퀴에 의해 조향되는 형태의 로봇으로 앞 바퀴 조향의 이동 로봇이다.

그림 5에 대한 대략적인 이동 로봇의 경우 변수가 다음과 같다.

여기서  $V_x$ 는 상수로 일정한 속도 0.5m/sec를 나타낸다고 가정하자.

아래 그림 6은 시뮬레이션 환경을 나타낸다. 로봇은 초기에 (0, 3.5m)에 위치하고 있으며, 장애물인 벽은 y축으로 4.5m에 위치하고 있다. 잘못 측정된 벽은 4.52m에 위치하고 있다고 가정하며, 로봇은 벽에 일정한 힘을 가한 채로 추종하도록 한다. 이때 종방향의 속도는 0.5m/초 이다.

- 실험 1: 대상체가 탄력적인 경우, 1000N/m

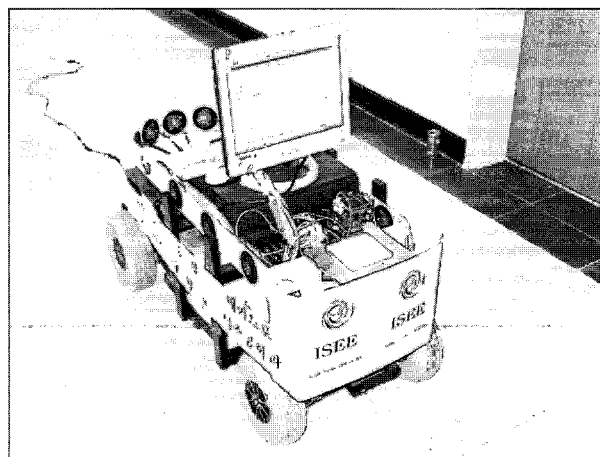


그림 5. 이동 로봇의 모습.  
Fig. 5. Mobile robot.

M (Kg)	Iz (Kgmsec <sup>2</sup> )	Cf (Kg/rad)	Cr (Kg/rad)	L1 (m)	L2 (m)
50	20	40	40	0.55	0.45

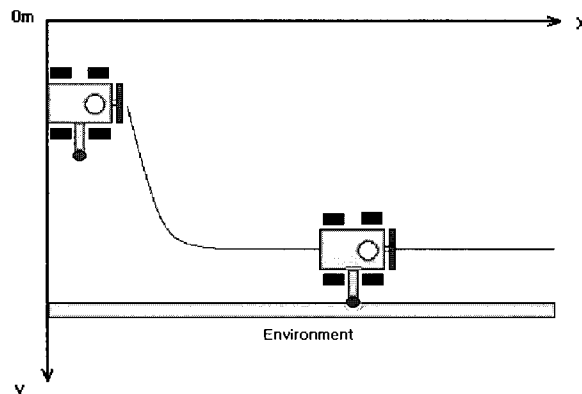


그림 6. 이동 로봇의 힘제어 환경.  
Fig. 6. Simulation environment.

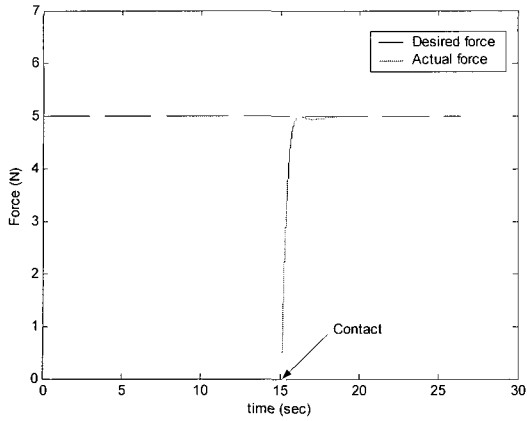


그림 7. 로봇의 힘 추종 제어.  
Fig. 7. Force tracking control.

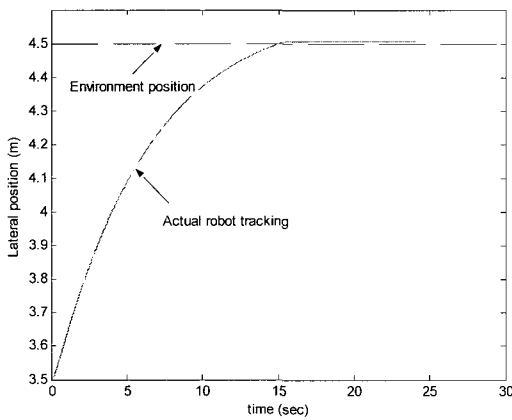


그림 8. 힘 추종 제어 횡방향 움직임.  
Fig. 8. Lateral force control tracking.

그림 7은 이동로봇의 힘제어 추종결과를 나타낸다. 원하는 힘은 5N으로 설정되었으며, 로봇이 잘 추종하는 것을 볼 수 있다. 로봇이 천천히 움직이므로 15초에서 벽과 접촉이 발생하여 계속적으로 접촉을 유지하며 움직이는 것을 볼 수 있다. 이때 임피던스 상수값은  $m=150$ ,  $b=10$ , 그리고 대상체의 강성도는  $1,000\text{N/m}$ 로 하였다. 원하는 힘은  $f_d=5\text{N}$ . 위치제어기의 값은  $k_{py}=1.2$ ,  $k_{dy}=2$ 로 설정하였다. 각도 제어를 위한 제어기 이득값은  $k_{pa}=0.1$ 과  $k_{da}=0.5$ 를 사용하였다.

그림 7은 실제 로봇이 움직인 횡방향의 경로를 나타낸다. 로봇이 4.5m 거리에 있는 벽과 접촉을 유지한 채로 벽 안쪽에 경로를 잘 유지하는 것을 볼 수 있다. 이는 실제 벽과 이 경로의 차이가 힘을 생성하여 귀환되어 제어되어지는 것이다.

그림 9는 이동로봇의 yaw 각도를 나타낸다. 초기에 방향을 벽 쪽으로 틀어 움직이다가 15초 경에 다시 벽과 평행한 방향으로 움직이는 것을 알 수 있다.

그림 10은 이동로봇에 입력되는 제어 신호를 나타낸다. 여기서 입력신호는 steering 각도가 된다.

그림 11은 대상체의 위치 측정을 달리 했을 경우에 나타나는 힘 추종 결과를 보여준다. 측정된 값을 각각 4.6m, 4.65m, 4.7m로 했을 경우에 나타나는 위치추종 결과이다. 그림에서 보면 측정 평가된 대상체의 위치가 정확하면 할수록 오버슈

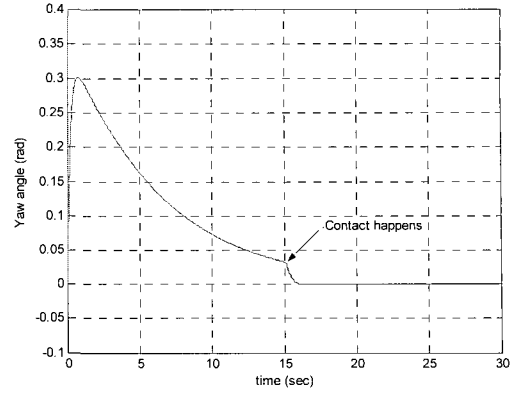


그림 9. Yaw 각도.  
Fig. 9. Yaw angle.

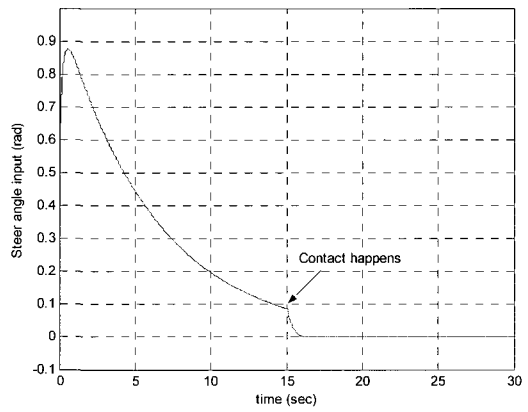


그림 10. 제어 입력.  
Fig. 10. Control input.

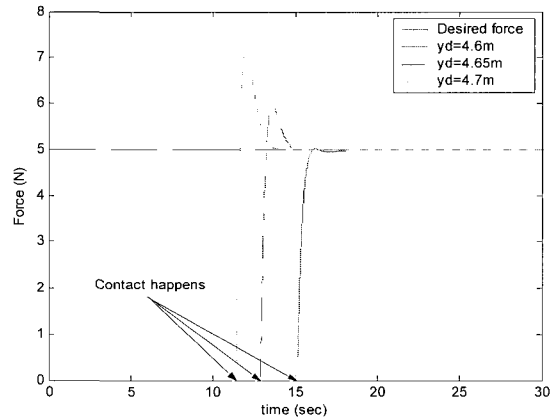


그림 11. 여러 위치 평가에 따른 위치 추종 결과.  
Fig. 11. Force tracking responses for different stiffness.

트가 작아짐을 알 수 있다. 4.6m일 경우에는 오버슈트가 거의 없으나, 4.7m로 했을 경우에는 2N정도의 오버슈트가 생기는 것을 알 수 있다. 또한 대상체의 위치를 잘못 측정했을 경우에는 위치 오차도 커지므로 로봇이 빨리 움직여 대상체와 접촉하는 시간이 빨라짐을 볼 수 있다.

- 실험 2: 대상체의 강성도가  $10,000\text{N/m}$  일 경우

그림 12에서는  $y_e=4.52$ ,  $m=500$ ,  $b=10$ ,  $k_{py}=1.5$ ,  $k_{dy}=0.5$  그리

고  $k_{p\phi} = 0.1$ ,  $k_{d\phi} = 0.5$ 를 사용하였다. 앞의 실험에서보다 오버슈트가 더 크게 나타나는 것을 볼 수 있지만 빠르게 원하는 힘을 따라가는 것을 볼 수 있다. 이는 대상체의 강성도가 커지면 작은 위치오차가 큰 힘을 생성하기 때문이다.

그림 13은 그에 따른 위치 추종을 나타낸다. 로봇은 대상체의 안쪽으로 추종하는 것을 볼 수 있다.

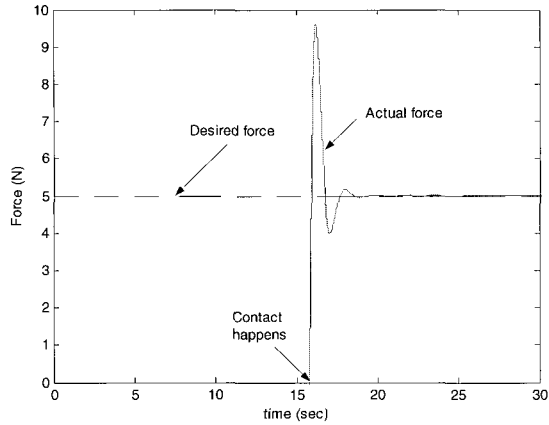


그림 12. 강성도가 10,000N/m 일 경우 힘 추종.  
Fig. 12. Force tracking for 10,000N/m.

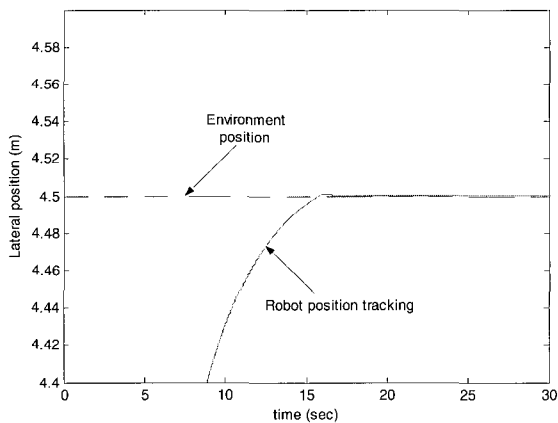


그림 13. 강성도가 10,000N/m 일 경우 위치 추종.  
Fig. 13. Position tracking for 10,000N/m.

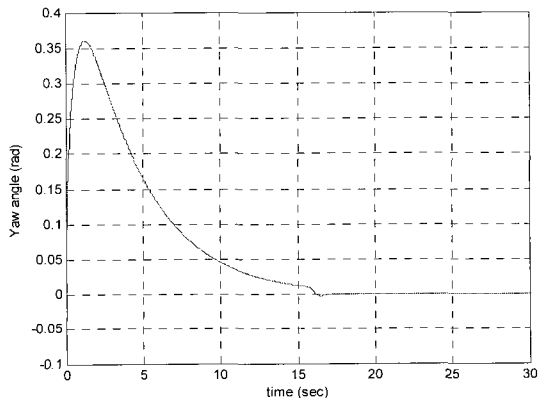


그림 14. Yaw 각도의 움직임.  
Fig. 14. Yaw angle.

그림 14는 yaw 각도의 추종을 나타낸다. 로봇이 초기에 주어진 yaw 각도 0도를 틀어 벽을 향해 움직이다가 다시 벽과 나란히 움직이기 위해 각도를 0으로 추종하는 것을 볼 수 있다.

그림 15는 제어 입력을 나타낸다.

• 실험 3: 원하는 힘 20N

다음 실험에서는 원하는 힘을 20N으로 하였다. 이 경우 임피던스 변수 중에서 관성 변수만  $m=1,000$ 으로 크게 하였고 나머지 변수들을 그대로 두었다. 15초를 지나서 대상체와 접촉을 이루는 것을 볼 수 있으며, 이전의 5N의 경우와 달리 오버슈트가 현저하게 줄어들 수 있다. 대상체의 강성도가 클수록 작은 힘을 제어하기가 어려움을 알 수 있다.

그림 17은 그에 따른 위치 추종 결과를 보여주고 있으며, 매우 부드럽게 움직이는 것을 볼 수 있다. 원하는 경로는 대상체의 안쪽으로 설정되어 있으며 로봇은 이 경로를 향해 움직이다가 대상체와 충돌하게 된다. 이 때 로봇이 대상체의 안쪽으로 추종하는 것을 볼 수 있으며 대상체의 위치와 실제 추종 위치의 차이가 힘을 생성하게 된다.

그림 18은 yaw의 각도를 나타낸다. 초기에 각도가 증가하다가 다시 감소하면서 15초가 지나면서 대상체와 평행하게 움직임으로 영으로 수렴하는 것을 볼 수 있다.

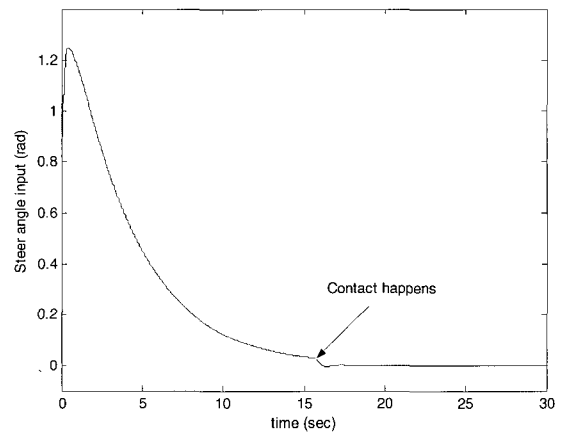


그림 15. 제어 입력 조향 각도.  
Fig. 15. Control input.

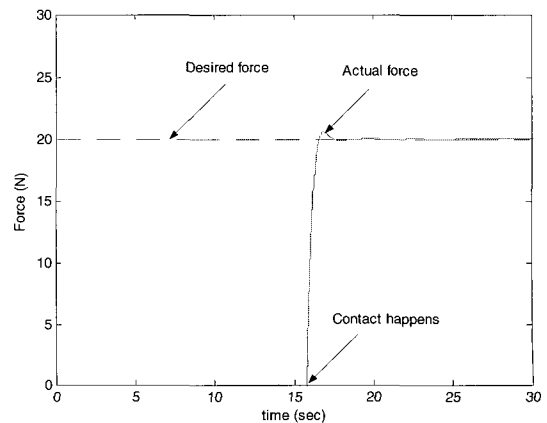


그림 16. 강성도가 10,000N/m 일 경우 힘 20N 추종.  
Fig. 16. 20N force tracking for stiffness 10,000N/m.

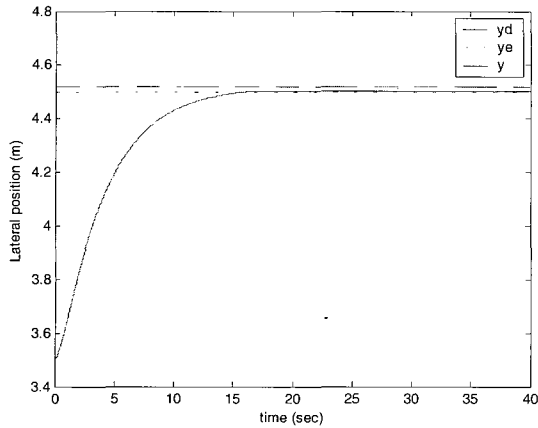


그림 17. 강성도가 10,000N/m 일 경우 위치 추종.  
Fig. 17. Position tracking for stiffness 10,000N/m.

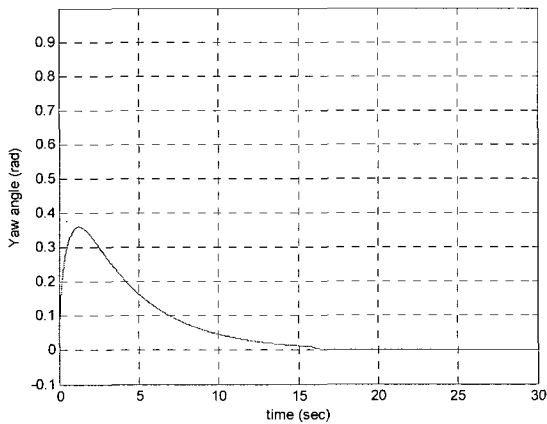


그림 18. Yaw 각도의 움직임.  
Fig. 18. Yaw angle.

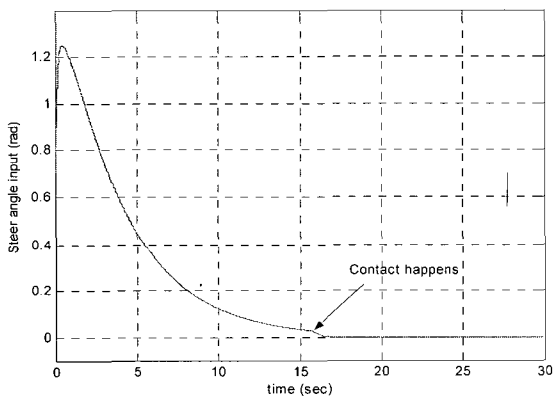


그림 19. 제어 입력 조향 각도.  
Fig. 19. Control input.

그림 19는 제어 입력 신호를 나타낸다.

**VI. 결론**

본 논문에서는 이동로봇의 바퀴의 슬립을 고려한 동역학식을 기본으로 로봇이 대상체와 함께 작업하는 경우의 한 방법으로 임피던스 힘제어 방식을 적용하였다. 대상체의 위치를 설정하여 로봇이 대상체와 접촉하면 힘이 생성되고 그 힘

을 제어하였다. 이때 이동 로봇이 장애물과 나란히 일정한 힘을 유지하며 움직이도록 임피던스 힘제어 방식을 설계하였다. 각 임피던스 변수들은 시행착오과정을 거쳐 최적화하였으며, 대상체의 가상의 평가 위치를 달리하며 힘추종 실험을 하였는데 그 결과, 오차가 크면 클수록 오버슈트가 크게 나타남을 확인 할 수 있었다. 또한 대상체의 강성도를 달리하여 실험한 결과 원하는 힘의 응답을 잘 추종하는 것을 볼 수 있었다.

본 논문의 결과는 이동로봇과 휴먼과의 협조작업, 이동로봇과 이동로봇과의 협조작업 등으로 연장될 수 있으며, 이는 앞으로의 연구방향이다.

**참고문헌**

- [1] M. Raibert and J. Craig, "Hybrid position/force control of manipulators," *ASME Journal of Dynamic Systems, Measurements, and Control*, vol. 102, pp. 126-133, 1981.
- [2] N. Hogan, "Impedance control : an approach to manipulator, part i, ii, iii," *ASME Journal of Dynamics Systems, Measurements, and Control*, vol. 3, pp. 1-24, 1985.
- [3] T. A. Lasky and B. Ravani, "Sensor based path planning and motion control for a robotic system for roadway crack tracking," *IEEE Trans. On Control Systems Technology*, col. 8, no. 4, pp. 609-622, 2000.
- [4] H. T. Cho, P. W. Jeon, and S. Jung, "Implementation and control of a roadway crack tracking mobile robot with force regulation," *IEEE Conf. On Robotics and Automations*, pp. 2444-2449, 2004.
- [5] K. Kosuge, T. Osumi, and K. Chiba, "Load sharing of decentralized-controlled multiple mobile robots handling a single object," *IEEE Conf. On Robotics and Automations*, pp. 3373-3378, 1997.
- [6] Y. Hirata, K. Kosuge, H. Asada, H. Kaetsu, and K. Kawabata, "Coordinated transformation of a single object by multiple mobile robots without position information of each robot," *IROS*, pp. 2024-2029, 2000.
- [7] N. Sarkar, X. Yun, and V. Kumar, "Control of mechanical systems with rolling constraints : application to dynamic control of mobile robots," *International Journal of Robotics Research*, vol. 31, pp. 55-69, February, 1994.
- [8] Y. Kanayama and F. Fahroo, "A new line tracking method for nonholonomic vehicles," *IEEE Conf. On Robotics and Automations*, 1997, pp 2908-2913.
- [9] Z. P. Jang and H. Nijmeijer, "Tracking control of mobile robots: a case study in backstepping," *Automatica*, vol. 33, no.7, pp. 1393-1399, 1997.
- [10] R. T. O'Brien, P. A. Iglesias, and T. J. Urban, "Vehicle lateral control for automated highway systems", *IEEE Trans. On Control Systems Technology*, pp. 266-273, 1996.
- [11] S. Y. Yang, S. T. Park, J. H. Jeong, B. R. Park, "Development of intelligent automated driving control system (lateral control)," *KORUS'99*, pp. 334-337, 1999.
- [12] S. J. Hong, J. Y. Choi, Y. I. Jeong, K. Y. Jeong, M. H. Lee, K. T. Park, K. S. Yoon, and N. S. Hur, "Lateral control of autonomous vehicle by yaw rate feedback," *IEEE Symposium on Industrial Electronics*, pp. 1472-1476, 2001.
- [13] R. H. Byrne, C. T. Abdallah, and P. Dorato, "Experimental results in robust lateral control of highway vehicles," *IEEE Control Systems Magazine*, pp. 70-76, 1997.

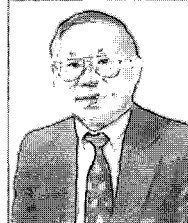
- [14] Longitudinal and lateral control of heavy duty trucks for automated vehicle following in mixed traffic: "Experimental results from the CHAUFFEUR project," *IEEE Conf. On Control Applications*, pp. 1348-1352, 1999.
- [15] L. Cai, A. B. Rad, and K. Y. Cai, "A robust fuzzy PD controller for automatic steering control of autonomous vehicles," *IEEE Conf. On Fuzzy Systems*, pp. 549-554, 2003.
- [16] J. Y. Wong, *Theory of Ground Vehicles*, John Wiley & Sons, 1978.
- [17] S. H. Yu and J. J. Moskwa, "A global approach to vehicle control: coordination of four wheel steering and wheel torques," *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, vol. 116, pp. 659-667, 1994.



#### 정 슬

1964년 9월 11일생. 1988년 미국 웨인 주립대 전기 및 컴퓨터 공학과 졸업. 1991년 미국 캘리포니아대 데이비스 전기 및 컴퓨터공학과 석사. 동대학 박사. 1997년~현재 충남대학교 메카트로닉스 공학과 부교수. 관심분야는 지능 제어

및 지능 로봇 시스템, 로봇과 인간, 무인 로봇의 위치 추정 및 제어.



#### T. C. Hsia

He received the B.S degree from National Taiwan University and the Ph. D degree from Purdue University, both in Electrical Engineering. After he received Ph.D degree, he became a professor at the Department of Electrical & Computer Engineering, the University of California, Davis. He has published over 180 papers on the area of systems, control, and robotics. He has served as a General Chair of IEEE ICRA'91; an Ad Com. Member(1991-93, and 1997); Vice President of Finance(1992-95); and the President (2000-2001). Dr. Hsia is an IEEE Fellow and the recipient of the IEEE Third Millennium Medal.