

햅틱 제어에 의한 원격작업의 안전성 향상

김운배 · 최기상[†] · 최기흥^{*}

서울시립대학교 전자전기컴퓨터공학부 · *한성대학교 기계시스템공학과
(2013. 3. 7. 접수 / 2013. 7. 24. 채택)

Safety Enhancement of Teleoperation using Haptic Control

Yun Bae Kim · Gi Sang Choi[†] · Gi Heung Choi^{*}

Department of Electrical and Computer Engineering, University of Seoul

^{*}Department of Mechanical Systems Engineering, Hansung University

(Received March 7, 2013 / Accepted July 24, 2013)

Abstract : For safe remote control, information on remote environment has to be delivered to operator realistically, and there have been numerous research efforts on this respect. Among them, haptic technology can significantly enhance safety and overall effectiveness of remote operation by delivering various kinds of information on virtual or real environment to operator. In this study, remote control based on haptic feedback is applied to control of mobile robot moving according to the command from operator avoiding collision with environmental obstacles and maintaining safe distance from them using ultrasonic sensors. Specifically, a remote feedback control structure for mobile robot is proposed. The controller is based on the inner feedback loop that directly utilizes information on distance to obstacles, and the outer feedback loop that the operator directly commands using the haptic device on which the computed reaction force based on the distance information is acting. Effectiveness of the proposed remote control scheme using double feedback loops is verified through a series of experiments on mobile robot.

Key Words : haptics, tele-operation, mobile robot.

1. 서론

원격작업 기술은 공장 등 위험한 환경에서 사람이 직접 할 수 없는 작업들을 안전하게 수행하는데 유용하게 이용되고 있다. 해저지형 탐사로봇¹⁾, 핵발전소내의 청소로봇²⁾ 그리고 건설작업로봇³⁾ 등이 그 좋은 예이다. 원격작업에서 조종자에게 원격 존재감을 주는 가장 좋은 방법은 카메라의 시각정보를 이용하는 것이다¹⁾. 하지만 동영상은 정보량이 많고, 카메라의 제한된 시야각 때문에 시각적인 정보가 충분하지 못한 경우도 있다. 이러한 경우 햅틱 피드백을 이용하면 가상 현실감이 현저히 높아져서 원격작업이 효과적으로 이루어질 수 있다. 또한 위험한 작업환경에서도 사고의 가능성을 낮추고 안전한 작업이 이루어지도록 하는데 도움이 될 수 있다³⁾.

최근 원격작업의 제어성능 향상을 위하여 햅틱 피드백을 적용하는 연구가 다양하게 이루어져 왔다³⁻⁸⁾. 이러한 연구들에서 여러가지 원격제어의 구조와 알고리즘이 제시되었으나 실제로 실시간 적용하는 실험보다는 시뮬레이션을 통해 그 효용성을 입증하려는 경우가 대부분이다. 햅틱 디바이스를 이용한 이동로봇의 안정적인 주행을 위해서 가상 임피던스 기법과 수동성 제어 이론을 응용한 연구도 있었으나, 원격지의 이동로봇을 안전하게 제어하는데 그

다지 성공적이지 못하였다^{9,10)}. 그 원인은 슬레이브 시스템인 이동로봇의 위치정보를 햅틱 디바이스를 통한 반력을 통해 작업자가 빠르고 정확하게 느끼게 해주기 어렵고, 이동로봇도 상황이나 모델에 따라 서로 다른 성능을 보이기 때문이다¹¹⁾.

본 연구에서는 힘 병합 방법을 이용하는 햅틱 원격조종의 구조를 제안하고 실제 이동로봇에 적용하여 그 효용성을 검증함으로써 햅틱 피드백이 위험한 작업환경에서 원격작업의 안전성을 향상시킬 수 있다는 것을 보이고자 한다.

2. 햅틱 디바이스를 이용한 이동로봇 원격제어

기본적인 이동로봇의 햅틱 원격제어 시스템은 햅틱 디바이스가 센서로 측정된 이동로봇의 주변정보를 이용해 적절한 반력을 가함으로써 작업자의 원격제어를 돕는 구조이다^{8,10,11)}. 결국 햅틱 디바이스는 작업자에 의해 조작되어지기 때문에 햅틱 디바이스의 출력에 의해서만 이동로봇의 제어가 이루어진다면 작업자의 시각적 혹은 촉각적 감각에 크게 의존하게 된다. 이 경우 이동로봇에 장착된 카메라의 제한된 시야각 때문에 작업자가 장애물을 인지하지 못할 수 있고, 햅틱 디바이스에 가해진 반력을 작업자가 인지하지 못하거나 인지하더라도 그 위험성을 간과해서 제대로 반응

[†]Corresponding Author: Gi Sang Choi, Tel : +82-2 6490-2323, Email: simpson@uos.ac.kr
Department of Electrical and Computer Engineering, University of Seoul, 163 Siripdaero, Dongdaemun-gu, Seoul 130-743, Korea

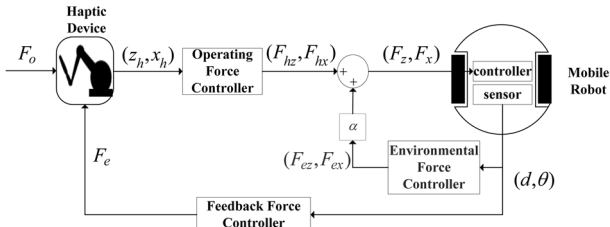


Fig. 1. Structure of the proposed motion control system for mobile robot.

하지 않는다면 이동로봇의 원하는 경로로부터의 이탈이나 장애물과의 충돌을 일으킬 수 있다.

Fig. 1은 본 연구에서 제안하는 이동로봇의 운동제어 구조를 보여준다. 이동로봇이 장애물에 접근함에 따라 발생하는 센서신호에 따라 햅틱 디바이스에 반력이 가해지고 작업자가 이 반력의 도움을 받아 직접 제어를 수행하는 외측 피드백 루프뿐 아니라 센서신호를 직접 이용하는 내측 피드백 루프를 가지는 이중 폐루프 제어를 적용해서 이동로봇 원격제어의 신뢰성과 안전성의 향상을 꾀하고자 한다. 즉, 외측 피드백 루프의 햅틱 디바이스를 이용하는 작업자의 조작 정보와 내측 피드백 루프의 직접적인 센서 정보를 동시에 적용하여 제어를 수행하며 파라미터 $\alpha(0 \leq \alpha \leq 1)$ 는 내측 피드백 루프의 외측 피드백 루프에 대한 상대적 가중치로서 0으로 하면 내측 피드백 루프가 배제되어 일반적인 햅틱 원격제어 시스템과 같아지고, 파라미터 α 를 크게 할수록 내측 루프의 영향이 커지게 된다. 이렇게 내측 루프와 외측 루프를 병합한다면 이동로봇에 인가되는 제어 입력은 식 (1)과 같이 된다.

$$\begin{pmatrix} F_z \\ F_x \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} F_{hz} \\ F_{hx} \end{pmatrix} + \alpha \begin{pmatrix} F_{cz} \\ F_{cx} \end{pmatrix} \quad (1)$$

이러한 병합 제어방법은 내측 피드백 루프를 통한 제어 입력 때문에 외측 피드백 루프를 통해 제어조작을 수행하는 작업자가 의도하지 않은 형태로 이동로봇을 움직이게 할 수도 있다. 하지만 장애물의 회피라는 측면에서 원격 조작의 안전성이 높아지는 효과를 가져 올 수 있다.

3. 이동로봇 원격제어의 구현

Fig. 2는 본 연구에서 구현한 이동로봇 원격제어 시스템을 보여준다. 이 원격제어 시스템은 작업자가 직접 조작하는 마스터 시스템과 제어대상인 원격지의 슬레이브 시스템으로 구성되며, 작업자는 마스터 시스템에서 IEEE-1394 포트로 컴퓨터와 연결된 햅틱 디바이스(Phantom Omni)를 이용하여 원하는 위치지령을 입력하고, 이 정보는 지그비(Zigbee) 무선통신 모듈을 이용하여 슬레이브 시스템으로 전달되어 이동로봇의 전후방향과 좌우방향 모터를 구동하게 된다. 반대로 이동로봇과 장애물 사이의 거리는 초음파 센서로 측정되어 역시 지그비 통신을 통해 마스터 시스템으

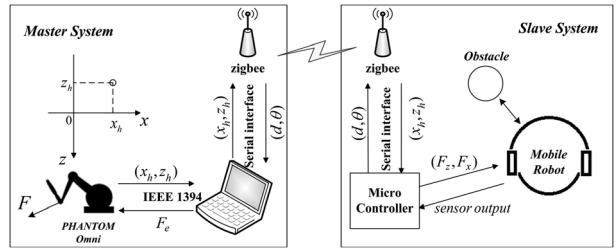


Fig. 2. Realization of remote motion control system for mobile robot.

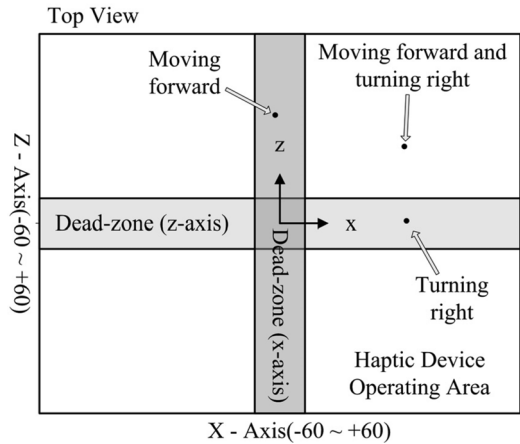


Fig. 3. Setting dead zone for haptic device.

로 전달되어 햅틱 디바이스를 통해 사용자가 전후방향과 좌우방향의 반력으로 느끼게 된다.

이러한 제어시스템에서 작업자가 조작하는 햅틱 디바이스가 중립위치 부근에서 민감하게 반응한다면 스위칭이 너무 쉽게 일어나서 불안정한 동작을 보일 수 있다. 따라서 Fig. 3에서와 같이 중립위치 부근에 좁은 데드존을 설정하여 이 영역에서는 이동로봇이 햅틱 디바이스로부터의 입력에 반응하지 않도록 하였다.

슬레이브 시스템으로의 제어입력이 햅틱 디바이스의 위치신호에 비례하도록 하고, 더불어 데드존을 설정한다면 q_z , q_x 가 x축과 z축 방향의 햅틱 디바이스 위치이고 x_{dz} 와 z_{dz} 가 각 축 방향 데드존의 크기, k_x 와 k_z 가 각 축 방향 비례상수일 때 각 축 방향의 제어입력 F_x , F_z 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{pmatrix} F_z \\ F_x \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} k_z & 0 \\ 0 & k_x \end{pmatrix} \begin{pmatrix} q_z \\ q_x \end{pmatrix} \quad (2)$$

$$q_z = \begin{cases} -z_h, & |z_h| > z_{dz} \\ 0, & |z_h| \leq z_{dz} \end{cases} \quad (3)$$

$$q_x = \begin{cases} x_h, & |x_h| > x_{dz} \\ 0, & |x_h| \leq x_{dz} \end{cases} \quad (4)$$

Fig. 4는 본 연구를 위해 제작된 이동로봇을 보여준다. 그림과 같이 두 개의 바퀴를 가지고 제자리 회전이 가능

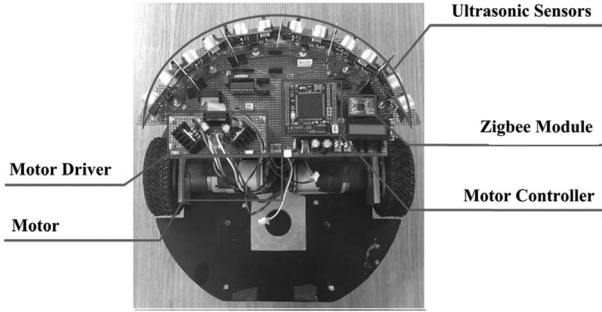


Fig. 4. 2-Wheeled mobile robot built for this study.

한 구조로서 마스터 시스템과 데이터를 송수신하기 위한 저가 무선통신 모듈이 장착되어 있으며, 무선통신 모듈과 로봇 컨트롤러는 시리얼 통신(UART)으로 연결된다. 또한 최대 측정거리를 50 cm로 설정한 여섯 개의 초음파 센서 (NT-TS601)가 전면부에 돌아가면서 장착되어 주변 장애물과의 거리를 측정한다.

센서로부터의 장애물까지 거리 정보를 이용하여 반력을 생성하는 간단한 방법은 거리가 가까워짐에 따라 선형으로 증가하는 스프링 반력을 이용하는 것이다. 하지만 스프링 반력만 이용할 경우 진동의 감쇄가 일어나지 않고, 시스템의 응답특성에 따라 이러한 진동이 증폭될 수도 있다. 이를 방지하고 안정성을 높이기 위해 본 연구에서는 스프링 반력에 댐핑 반력을 추가한 스프링-댐퍼 모델을 적용하였다(Fig. 5 참조). 이러한 스프링-댐퍼 모델은 식 (5)와 같이 반력을 생성한다.

$$F_c = \begin{cases} K_e(d_{max} - d) + b_e(-\dot{d}), & d \leq d_{max} \\ 0, & d > d_{max} \end{cases} \quad (5)$$

여기서 K_e 와 b_e 는 각각 스프링 상수와 댐핑 상수이며, d 는 이동로봇과 장애물 간의 거리이고, d_{max} 는 장애물이 이동로봇에 영향을 주기 시작하는 최대거리를 의미하며 이보다 멀리 있는 장애물은 무시한다. 또한 i 번째 센서에 의해 생성되는 반력 F_i 는 센서가 측면에 대해 θ_i 의 각도로 기울어

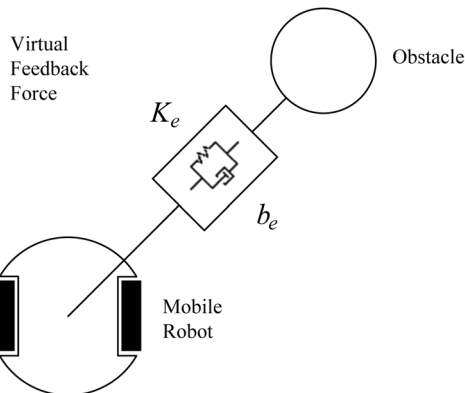


Fig. 5. Generation of reaction force using the spring-damper model.

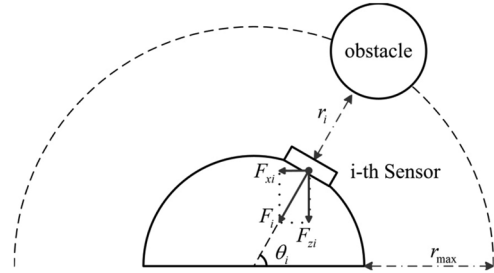


Fig. 6. Generation of reaction force by the i th sensor.

져 있을 때 식 (6)과 같이 각 축 방향의 힘으로 분해된다(Fig. 6 참조).

$$(F_{xi}, F_{zi}) = (F_i \cdot \cos\theta_i, F_i \cdot \sin\theta_i) \quad (6)$$

이 두 방향의 힘은 피드백 되어 마스터 시스템의 햅틱 디바이스에 의해 발생되며 작업자는 스프링 반력만 적용된 경우보다 더 부드러운 반력을 느낄 수 있다.

한편 작업자가 조작하는 햅틱 디바이스의 x 축과 z 축의 방향의 변위는 각각 이동로봇의 좌우방향과 전후방향의 제어입력으로 변환되며 로봇에 장착된 마이크로 컨트롤러는 두 방향의 제어입력에 따라서 양쪽 바퀴의 토크를 제어한다. 두 바퀴를 가진 이동로봇의 경우 자유도의 제한 때문에 비홀로노믹(nonholonomic) 시스템이다. 즉 x 축 제어입력의 방향은 바퀴의 진행방향과 다르기 때문에 온전히 좌우방향으로의 힘으로 변환될 수 없다. 따라서 두 바퀴의 회전력의 차이에 의해 발생하는 회전모멘트로 대체하였다(Fig. 7 참조). 한편, 회전모멘트 M_x 와 전후방향의 힘 F_z 는 f 가 원

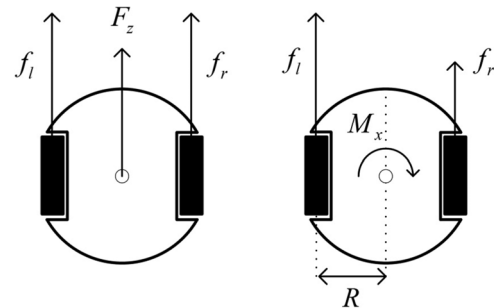


Fig. 7. Forces acting on the wheels of mobile robot.

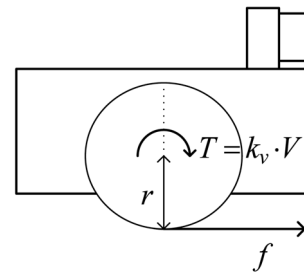


Fig. 8. The force exerted to the wheel by the motor torque.

쪽 바퀴에 작용하는 힘이고, f_r 가 오른쪽 바퀴에 작용하는 힘일 때 식 (7,8)와 같이 나타낼 수 있다. 반대로 각 바퀴에 작용하는 힘 f_l, f_r 는 식 (9,10)과 같이 나타내진다.

$$F_z = f_l + f_r \quad (7)$$

$$M_x = (f_l - f_r)R \quad (8)$$

$$f_l = (F_z + M_x/R)/2 \quad (9)$$

$$f_r = (F_z - M_x/R)/2 \quad (10)$$

또, 두 바퀴에 작용하는 힘은 각각 식 (11)과 같이 두 바퀴에 장착된 모터에 의해 발생하는 토크 T 에 비례하며 (Fig. 8 참조), 모터의 토크는 식 (12)와 같이 입력전압 V 에 비례한다.

$$f = T/r \quad (11)$$

$$T = k_v \cdot V \quad (12)$$

4. 실험

먼저 스프링-댐퍼 모델의 효용성을 검증하기 위하여 실험을 수행하였다. 햅틱 디바이스를 조작해 이동로봇을 전후방향의 목표하는 위치로 이동시키면서 이동로봇이 장애물에 접근함에 따라 스프링 모델과 스프링-댐퍼 모델을 적용했을 때 각각 어떤 응답을 보이는지를 측정하여 비교하였다(Fig. 9 참조). 목표거리 d_t 는 30 cm로 정하고 50 cm 지점부터 출발하여 목표 거리에 도달할 때까지의 궤적을 기록하였다. 최대속도는 0.2 m/sec으로 제한하였으며, 피드백 계인을 바꿔가며 실험하였다. Fig. 10은 각각 스프링 모델과 스프링-댐퍼 모델을 적용했을 때 로봇의 궤적을 비교하여 보여준다.

스프링 모델을 적용한 (a), (b)의 경우와 스프링-댐퍼 모델을 적용한 (c), (d)의 경우를 비교해 보면 스프링-댐퍼 모델을 적용했을 때 장애물에 대해 빠른 반응을 보이고, 볼

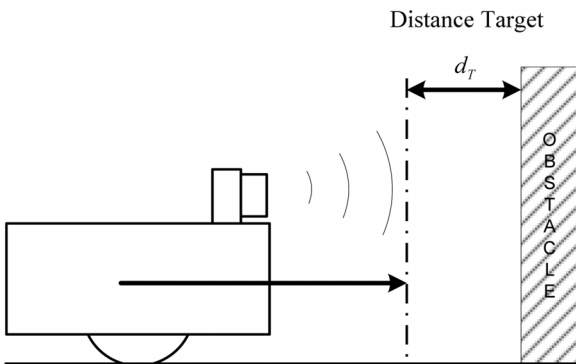
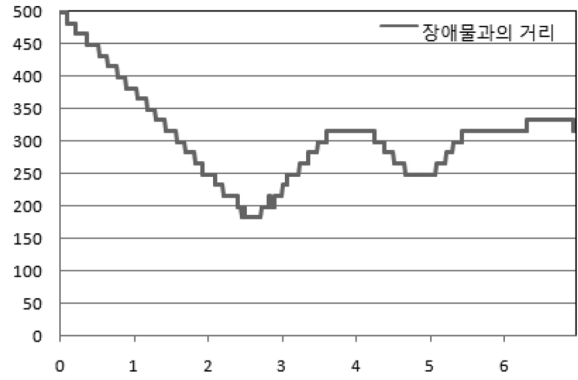
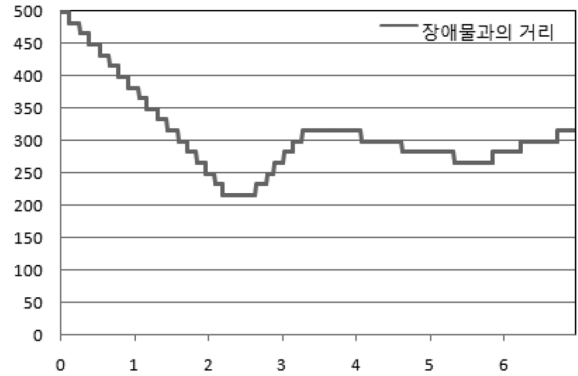


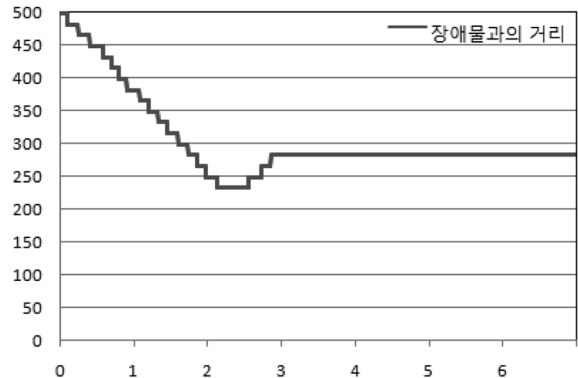
Fig. 9. Mobile robot approaching an obstacle.



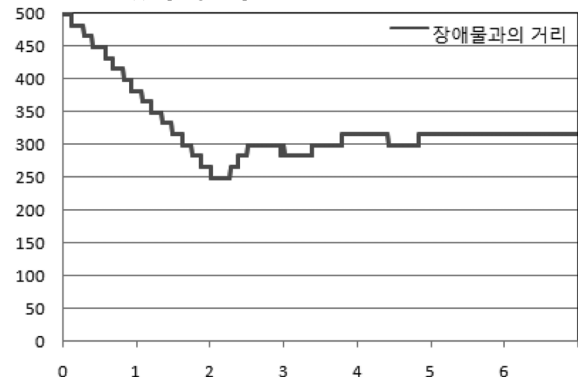
(a) Spring model 1, $K_s=0.3$



(b) Spring model 2, $K_s=0.4$

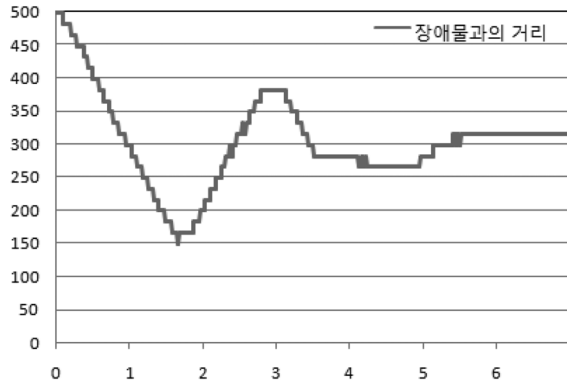


(c) Spring-damper model 1, $K_s=0.4, b_c=0.1$

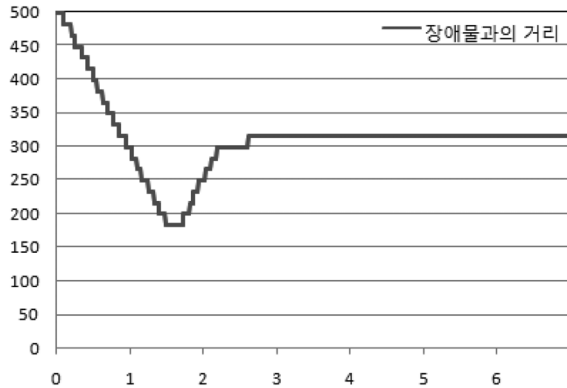


(d) Spring-damper model 2, $K_s=0.4, b_c=0.15$

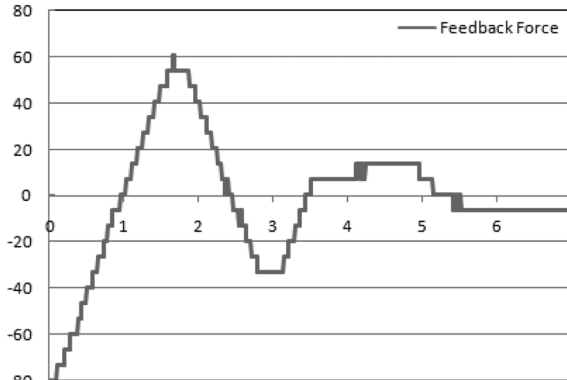
Fig. 10. Trajectories of robot depending on feedback force generation model (K_s, b_c represent spring constant and damping constant, respectively, while vertical axis and horizontal axis represent position(mm) and time(sec), respectively).



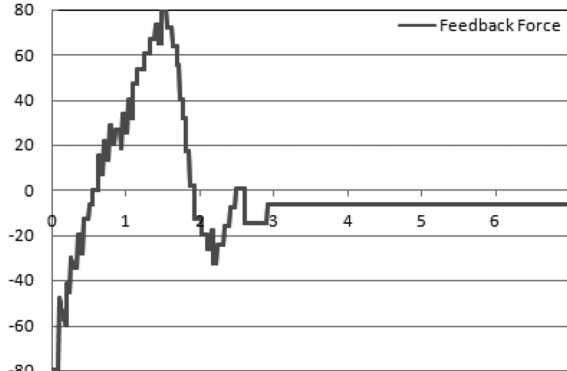
(a) Position(mm) vs. time(sec), spring-model



(b) Position(mm) vs. time(sec), spring-damper-model



(c) Force(unit) vs. time(sec), spring-model



(d) Force(unit) vs. time(sec), spring-damper model

Fig. 11. Trajectories and feedback reaction forces of the mobile robot depending on feedback force generation model($K_c=0.3$, $b_c=0.15$, maximum speed = 0.3 m/sec).

필요한 진동이 줄어들며, 오버슈트의 크기도 작아지는 것을 볼 수 있다. 또한 댐핑이 없는 단순 스프링 모델의 경우 진동의 감쇄가 느리게 일어나서 목표거리에 도달하기까지의 시간이 길어지는 것을 볼 수 있다. 또 이러한 현상은 이동 로봇의 속도가 높아지면 더 현저하게 나타나는 것을 확인하였다.

Fig. 11의 (a)와 (c)는 스프링 모델을 적용한 경우에 대하여 이동로봇의 궤적과 그에 따라 생성되는 반력을 보여준다. 반력은 정확히 거리에 비례하는 것을 볼 수 있다. 반면 (b)와 (d)의 스프링-댐퍼 모델의 경우, 같은 거리에서도 장애물에 접근하는 경우와 멀어지는 경우에 반력이 서로 달라지는 것을 볼 수 있다. 또 (a)와 (b)를 비교하면 스프링-댐퍼 모델 (b)의 위치오차가 스프링 모델 (a)의 위치오차보다 작은 것을 알 수 있다. 이러한 실험의 결과는 스프링-댐퍼 모델을 유효적절하게 이용하면 단순 스프링 모델의 경우에 비해서 과도 응답 특성을 개선할 수 있음을 보여준다.

또, 이동로봇의 주행실험도 실시하였다. 이 실험은 폭 60 cm, 길이 2 m의 Fig. 12와 같이 두 번 굴절된 통로를 통하여 이동로봇을 이동시키는 것으로 조종자는 눈을 감고 오로지 햅틱 디바이스로부터 느껴지는 손의 감각만으로 조종하도록 하였고, 통로의 끝까지 충돌없이 가는 것을 실험의 목표로 설정하였다. 그리고 제안한 이중 페루프 제어를 적용했을 때와 햅틱 디바이스만에 의한 단일 페루프 제어를 했을 때 각각 로봇의 궤적을 측정하여 비교분석하였다.

Fig. 13은 두 경우에 대하여 제작된 통로를 지나는 이동로봇의 궤적을 비교한 것이다. 이 실험에서 이중 페루

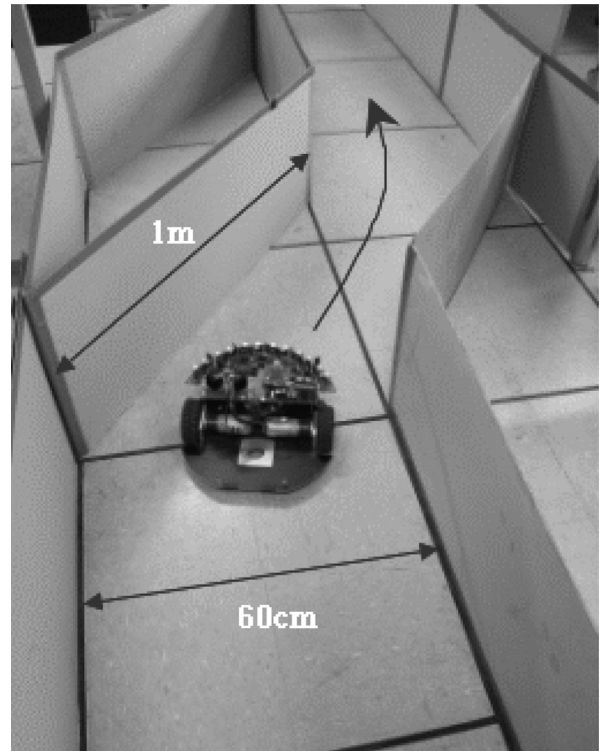


Fig. 12. Driving the mobile robot through the designed test path.

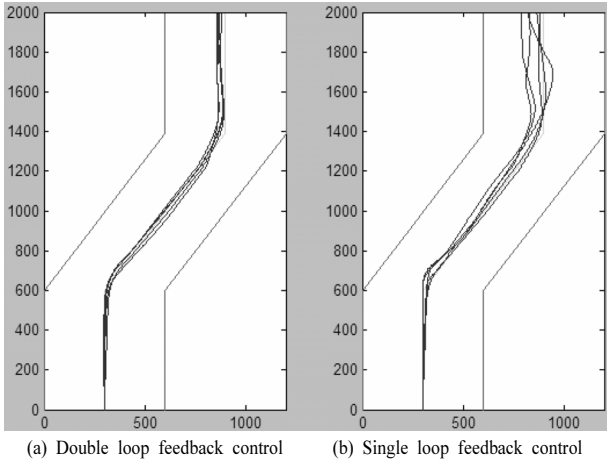


Fig. 13. Trajectories of the mobile robot through the designed test path(Unit for the x axis and y axis: cm).

프 제어방법을 이용하지 않은 (b)의 경우는 이용한 (a)의 경우에 비해서 로봇 이동궤적의 기준중심선으로 부터의 오차가 240% 이상 증가하였다. 이중 페루프 제어를 하지 않은 경우 로봇의 조종이 전적으로 햅틱 디바이스의 명령에 의해 이루어지고 햅틱 디바이스는 결국 작업자에게 조종하므로, 장애물에 대한 정보를 작업자에게 햅틱 피드백 해주더라도 작업자의 컨디션이나 주관적인 느낌이 이동 로봇의 동작에 많은 영향을 끼친다. 그러나 이중 페루프 제어방법을 통해서 햅틱 디바이스의 위치정보 뿐 아니라 로봇 주변의 장애물에 대한 정보를 직접 피드백하여 보상하면 (a)와 같이 상대적으로 안정된 이동궤적을 나타내는 것을 볼 수 있다.

이중 페루프 제어방법의 장점은 Fig. 14와 같이 통로 통과에 걸린 시간 측면에서도 볼 수 있다. 이 제어방법을 이용하면 더 짧은 시간 내에 통로를 통과하게 되는 것을 알 수 있다. 이중 페루프 제어를 하는 경우 충돌의 위험성이 줄어서 사용자에게 안정감을 주기 때문에 자신있게 더 빠른 주행을 할 수 있었다.

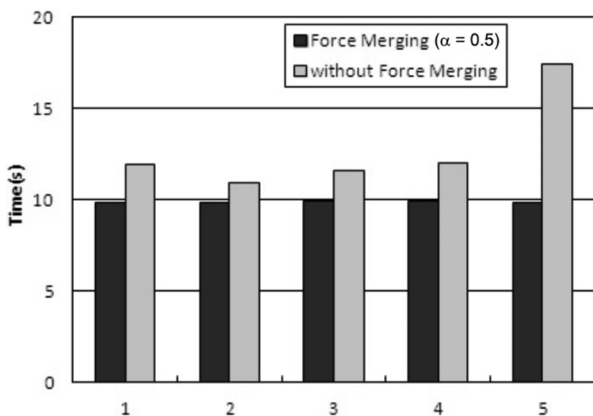


Fig. 14. Comparison of passing times for the cases of using double loop feedback control and single loop feedback control.

5. 결론

본 연구에서는 이중 페루프 제어방법을 이용하는 원격제어 시스템의 구조를 제안하고 이동로봇의 주행에 적용하여 안정성 향상에 유용함을 검증하였다. 구체적으로 이동로봇에서 장애물과의 거리정보를 이용하여 피이드백 반력을 생성할 때 접근거리에 비례하는 스프링 반력에 접근속도에 비례하는 댐핑 반력을 추가함으로써 성능개선이 될 수 있음을 확인하였다. 또한 근접한 장애물 때문에 생성된 반력을 외측 루프를 통하여 피이드백 하여 햅틱 디바이스에 반영할 뿐 아니라 내측 루프를 통하여 직접 피이드백 하여 로봇의 구동에 반영하는 이중 페루프 제어방법을 제안하여 적용하고 검증하였다. 이러한 연구의 결과는 제안한 햅틱 피이드백 방법이 공장 등 위험한 작업환경에서 작업자가 직접 할 수 없는 작업을 원격 수행할 때 현장감을 높여 주어서 원격작업을 보다 안전하게 수행하는데 도움이 된다는 것을 보여주었다.

감사의 글: 이 논문은 2012년도 서울시립대학교 교내학술연구비의 의해 연구되었음.

References

- 1) Q. Lin and C. Kuo, "Virtual tele operation of underwater robots," in Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation, Albuquerque, NM, USA, 1997.
- 2) J. P. K. Kim, H. Lee and M. Yang, "Robotic Contamination Cleaning System," in IEEE Conference on Intelligent Robots and Systems, Lausanne, Switzerland, October 2002.
- 3) X. Tang and H. Yamada, "Haptic Interaction in Teleoperation Control System of Construction Robot Based on Virtual Reality," in Proceedings of the IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, Changchun, China, 2009.
- 4) B. Horan and S. Nahavandi, "Intuitive Haptic Control Surface for Mobile Robot Motion Control," Proceedings of the IEEE International Workshop on Safety, Security and Rescue Robotics, Sendai, Japan, 2008.
- 5) I. Farkhatdinov, J. H. Ryu and J. Poduraev, "A User Study of Command Strategies for Mobile Robot Teleoperation," Journal on Intelligent Service Robotics, Volume 2, Issue 2, p. 95, 2009.
- 6) I. Farkhatdinov, J. H. Ryu and J. An, "A Preliminary Experimental Study on Haptic Teleoperation of Mobile Robot with Variable Force Feedback Gain." Proc. of IEEE Haptics Symposium, Waltham, Boston, USA, 2010.
- 7) S. Lee, G. S. Sukhatme, G. J. Kim and C. M. Park, "Haptic Control of a Mobile Robot: A user study," In Proceedings of IEEE/RSJ IROS, Lausanne, Switzerland, 2002.
- 8) S. Lee, G. J. Kim, G. S. Sukhatme and C. M. Park, "Effects of Haptic Feedback on Telepresence and Navigational

- Performance,” Proc. of Intl. Conference on Artificial Telexistence, Seoul, South Korea, 2004.
- 9) N. Diolaiti and C. Melchiorri, “Tele-Operation of a Mobile Robot Through Haptic Feedback,” Proc. of IEEE Int. Workshop on Haptic Virtual Environments and Their Applications, Ottawa, Ontario, Canada, 2002.
- 10) J. H. Ryu, D. S. Kwon and B. Hannaford, “Stable Teleoperation with Time Domain Passivity Control,” Proc. of IEEE Transactions on Robotics and automation, 2004.
- 11) J. Ryu, J. Kim, C. Seo, Y. Lim, and J. P. Kim, “A Surbey of Haptic Control Technology,” Journal of the Korean Society of Mechanical Engineers-A, Vol. 33, No. 4, pp. 283~295, 2009.