

힘 반향 조이스틱을 이용한 햅틱 인터페이스

A Haptic Interface Using a Force-Feedback Joystick

고 애 경, 최 준 영*, 김 홍 철, 이 장 명

(Ae-Kyoung Ko, Joon-Young Choi, Hong-Chul Kim, and Jang-Myung Lee)

Abstract : We propose a haptic interface algorithm for joystick operators working in remote control systems of unmanned vehicles. The haptic interface algorithm is implemented using a force-feedback joystick, which is equipped with low price DC motors without encoders. Generating specific amounts of forces on the joystick pole according to the distance between a remote controlled vehicle and obstacles, the haptic interface enables the operator to perceive the distance information by the sense of touch. For the case of no joystick operation or no obstacles in the working area, we propose an origin control algorithm, which positions the joystick pole at the origin. The origin control algorithm prevents the false movement of the remote vehicles and provides the operator with a realistic force resisting the joystick pole's movement. The experiment results obtained under various scenarios exemplify the validity of the proposed haptic interface algorithm and the origin control algorithm.

Keywords : haptic interface, force-feedback joystick, proportional-derivative control

I. 서론

인간의 오감 중 시각 및 청각 정보의 구현에 관한 연구는 오래 전부터 진행되어 왔으며 실생활에 많이 사용되고 있지만 다른 감각에 대한 연구는 아직 미비한 상태이다. 인간의 오감 중 특히 촉감이나 역감의 전달 및 구현에 관하여 연구하는 분야가 haptics이다. 최근에는 가상물체에 대한 다양하고 정확한 정보를 사용자에게 전달하기 위하여 역감 및 촉감의 정밀한 구현의 필요성이 부각되고 있다. 햅틱 인터페이스는 그림 1과 같이 인간에게 자극(tactile/force)을 전달하고, 인간의 운동 정보(motion)를 감지하는 양방향성 구조를 기본적으로 채택하고 있다[1].

무인차량 원격 운전 시스템에서 사용되는 조이스틱 기구부와 조이스틱 제어 장치는 개념적으로 그림 1의 햅틱 인터페이스에 해당되기 때문에 햅틱 인터페이스는 기본적으로 원격 조작에서 그 기술적 시작이 이루어졌다고 할 수 있다 [1]. 이러한 햅틱 인터페이스를 위한 요소 기술은 촉감 반향을 위한 하드웨어 기술과 햅틱 렌더링이라 불리는 촉감 재현을 위한 관련 소프트웨어 기술로 분류할 수 있다.

[2]에서는 인체의 모든 부위에서 촉감 신경 분포와 촉각 인지 역치를 이용하여 인체의 가장 예민한 부분을 조사하였다. 그 결과 사람의 엄지 손가락, 집게 손가락, 윗입술 등이 가장 예민한 신체 부위로 나타났다. 이로부터 질감이나 역감을 사용자에게 반향 해주는 햅틱 장치는 손가락을 대상으로 개발하는 것이 유용하다는 것을 알 수 있다. 이러한 의미에서 조이스틱은 인간의 촉감에 가장 예민한 부위인 엄지 손가락과 집게 손가락을 모두 사용하는 기구이므로 햅틱 장치 구현에 매우 적합하다[2].

힘 반향 조이스틱을 이용한 원격제어와 관련된 기존의 논

* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수 : 2007. 2. 2., 채택확정 : 2007. 11. 12.

고애경, 최준영, 김홍철, 이장명 : 부산대학교 전자전기통신공학부 컴퓨터정보통신연구소

(greatak@pusan.ac.kr/jyc@pusan.ac.kr/hit_pnu@pusan.ac.kr/jmlee@pusan.ac.kr)

※ 본 연구는 2005년도 부산대학교 교내학술연구비(신입교수연구정착금)에 의한 연구임.

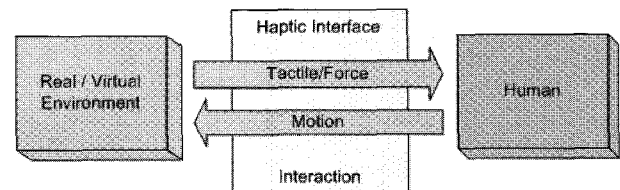


그림 1. 햅틱 인터페이스 동작 개념.

Fig. 1. Motion concept of haptic interface.

문들은 장애물 인식 알고리즘 또는 햅틱 장치의 구현에 중점을 두고 있고, 조이스틱 운전자가 원격차량과 장애물 사이의 거리를 감지 할 수 있는 반향 힘의 구현 방법에 관한 연구는 현재 미비한 실정이다[3-5].

본 연구에서는 조이스틱에 인코더가 없는 저가형 DC모터를 장착하여 햅틱 장치를 구현하였다. 원격 차량은 실시간으로 장애물과의 거리 정보를 조이스틱 제어기로 전송하고 조이스틱 제어기는 운전자가 이동하려는 방향을 조이스틱 봉의 위치를 측정하여 감지한다. 장애물의 방향과 운전자의 이동 방향이 일치할 경우에는 조이스틱에 장착된 DC모터를 통하여 원격 차량의 이동 방향과 반대 방향으로 힘을 발생시켜 촉감을 재현한다. 동시에 운전자가 힘을 가하지 않을 때에는 조이스틱 봉이 항상 원점에 위치하도록 제어하는데 이러한 원점 제어를 통하여 원격 차량의 오동작을 방지하고 현실감 있는 저항력을 발생시킨다. 따라서 본 연구에서는 다음과 같은 두 가지 목적을 동시에 달성하는 알고리즘을 제안한다. 첫 번째 목적은 원격 차량과 장애물의 거리 정보를 운전자에게 전달하기 위한 반향 힘을 조이스틱 봉에 재현하는 것이며 두 번째 목적은 조이스틱 봉이 원점에 위치할 수 있도록 제어하는 것이다.

II. 본론

1. 전체 시스템 구성 및 동작 원리

본 연구에서는 [6]에서 개발된 단일 홀 센서 비접촉식 전자 조이스틱에 인코더가 없는 저가형 DC모터를 장착하여 구현한 힘 반향 조이스틱을 사용한다. 구현한 힘 반향 조이스

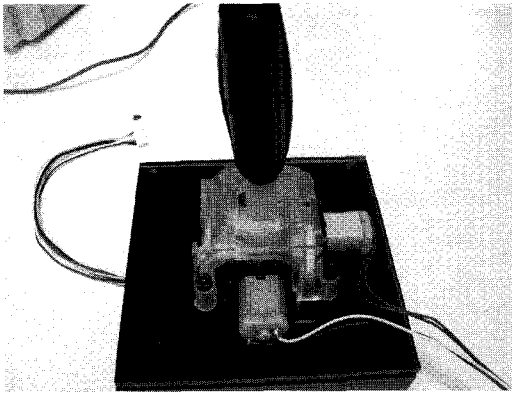


그림 2. 힘 반향 조이스틱.
Fig. 2. Force feedback joystick.

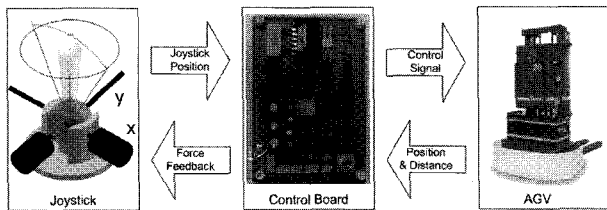


그림 3. 전체 시스템 구성도.
Fig. 3. Overall system structure.

틱의 실제 모습은 그림 2에 나타나 있다.

시스템의 전체 구조는 그림 3과 같고 동작 원리는 다음과 같이 설명된다. 조이스틱 봉의 위치는 조이스틱에 장착된 홀 센서를 이용하여 측정되고 이 위치는 제어 보드에서 원격 차량이 이동할 방향과 속력으로 전환되어 원격 차량으로 전송된다. 원격 차량은 장애물과의 거리 정보를 실시간으로 제어 보드로 전송하고 제어 보드는 이 정보를 이용하여 반향 힘의 방향과 크기를 결정하고 DC모터를 통해 재현한다. 이때 DC 모터에서 발생하는 힘의 크기는 이동 차량과 장애물 사이의 거리 정보를 나타내고 이를 토대로 운전자는 원격지에서 원격 차량과 장애물 사이의 거리 정보를 인식하게 된다.

2. 원점 제어

조이스틱이 오랜 시간 사용되면 기구부 조인트 부분의 마모로 인하여 정확한 원점 복귀가 어렵게 된다. 또한 운전자가 조이스틱을 조작하고 있지 않을 경우와 운전자가 조작 중 조이스틱을 놓치는 등의 실수가 발생하는 경우에 원격차량의 오동작을 방지하기 위하여 조이스틱은 원점으로 복귀해야 한다. 그리고, 작업 영역에 장애물이 없을 경우 현실감 있는 원격 차량 운전을 위하여 조이스틱 운전자가 일정한 저항력을 느끼도록 하는 것이 필요하다. 이러한 관점에서 조이스틱 봉이 원점으로 복귀하도록 하는 원점 제어 알고리즘이 필요하다[5,7].

본 연구에서는 정확한 원점 제어를 위하여 시스템의 안전성과 성능을 증가시키는 비례미분 제어 기법을 이용한다. 원점 제어를 위한 비례미분 제어는 조이스틱 제어기 보드에 장착된 마이크로 프로세서를 이용하여 이산시간 기반으로 구현한다. 홀 센서를 이용하여 조이스틱 봉의 위치를 측정하여 위치 오류와 속도 오류를 아래와 같은 식에 의하여 생성한다.

$$e_x(k) = x(k) - x_d \quad \dot{e}_x = e_x(k) - e_x(k-1) \quad (1)$$

$$e_y(k) = y(k) - y_d \quad \dot{e}_y = e_y(k) - e_y(k-1) \quad (2)$$

(1)과 (2)의 x, y 는 조이스틱 봉의 위치, x_d, y_d 는 제어 목표 값, e_x, e_y 는 위치 에러, \dot{e}_x, \dot{e}_y 는 속도 에러이며 본 연구에서는 $x_d = 0, y_d = 0$ 이 된다. 이러한 위치 오류와 속도 오류를 이용하여 모터에 인가되는 전압 제어 입력을 식으로 표현하면 다음과 같다.

$$u_x(k) = -k_p e_x(k) - k_v \{e_x(k) - e_x(k-1)\} \quad (3)$$

$$u_y(k) = -k_p e_y(k) - k_v \{e_y(k) - e_y(k-1)\} \quad (4)$$

여기서 u_x 와 u_y 는 모터에 인가되는 전압 입력이며 k_p 는 위치 오류 비례상수이며 k_v 는 속도 오류 비례 상수이다.

3. 햅틱 인터페이스

대부분의 햅틱 장치는 모터 또는 브레이크를 주 동력원으로 이용하는데 특히 모터는 원하는 크기의 힘을 원하는 방향으로 출력할 수 있으며 응답 성능 또한 우수한 장점을 가지고 있다[8,9]. 조이스틱을 이용한 원격 차량의 운전에서 더욱 안전하고 정밀한 제어를 위해서는 운전자가 원격지의 원격차량이 장애물과 얼마나 떨어져 있는지를 실시간으로 알 수 있어야 하므로 본 연구에서는 응답이 느린 브레이크보다 응답 성능이 우수한 모터를 이용하여 햅틱 장치를 구현한다. 한편 조이스틱의 위치는 홀 센서에서 측정이 되므로 인코더가 없는 저가형 DC모터를 사용한다.

3.1 장애물 정보

원격 차량과 장애물 사이의 거리를 장애물의 방향과 함께 실시간으로 측정하여 조이스틱 제어기로 전송 한다. 그림 4와 같이 거리를 5단계로 나누어 조이스틱 제어기로 전송한다고 가정한다. 그림 4의 영역 5에서와 같이 장애물과 원격 차량 사이의 거리가 가장 먼 경우에는 조이스틱 봉의 DC모터에서 가장 약한 힘을 발생하고 가장 가까운 거리에 위치한 그림 4의 영역 1에서는 가장 큰 힘을 장애물의 방향과 반대 방향으로 발생한다.

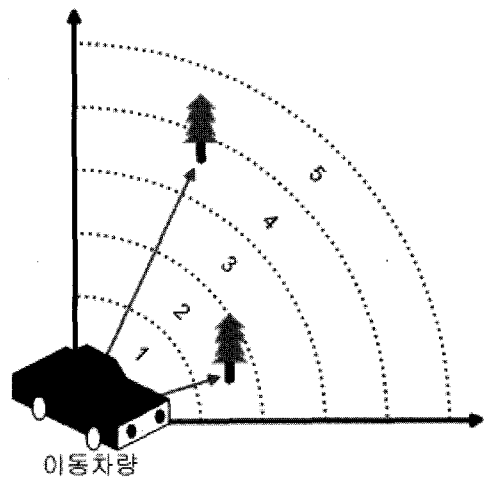


그림 4. 이동차량과 장애물 사이의 거리 정보.
Fig. 4. Distance information between remote vehicle and obstacle.

3.2 반향 힘 재현

반향 힘을 재현하기 위하여 그림 5와 같이 우선 조이스틱 봉의 끝부분이 원점에 위치하였을 때를 중심으로 영역 1과 영역 2로 조이스틱 봉의 운동 영역을 구분한다. 원격 차량이 장애물이 없는 방향으로 이동할 경우에는 영역 1과 영역 2 모두에서 원점 제어 알고리즘만 적용된다. 한편, 원격 차량이 장애물이 있는 방향으로 이동할 경우 영역 2에서는 이동 차량과 장애물과의 거리에 따라 각기 다른 힘을 반향하고 영역 1에서는 원점 제어 알고리즘을 적용한다. 즉, 햅틱 인터페이스를 위한 반향 힘은 그림 5의 영역 2에서 재현되는 것이다.

원격차량이 장애물 방향으로 이동 할 때 반향 힘을 생성하므로 장애물과 평행하게 이동할 때에는 반향 힘을 생성하지 않는다. 또한 장애물이 이동하거나 회전하는 경우에도 원격 차량이 그 장애물의 방향으로 이동하면 반향 힘을 생성하므로 장애물의 상태에 구애 받지 않고 조작자가 효과적으로 장애물과의 거리를 감지할 수 있도록 한다.

원격 차량으로부터 장애물과의 방향과 거리 정보가 전달 될 때 만약 운전자가 장애물 방향으로 조이스틱을 조작할 경우 조이스틱이 움직이는 방향과 반대 방향으로 힘을 발생한다. 모터 제어 보드의 PWM 장치에서 생성 할 수 있는 최대 인가 전압 내에서 전압 크기를 5단계 값으로 구분하여 전송 받은 원격 차량과 장애물 사이 거리에 반비례하게 전압을 발생시킨다.

운전자의 조이스틱 봉에 구현되는 힘은 모터 회전에 의한 토크로 발생된다. 모터의 토크는 전류에 비례하므로 정확한 힘을 제어하기 위해서는 모터 전류를 제어해야 하지만 본 연구에서는 모터 전압과 발생 토크가 비례한다고 가정한다.

원격 차량을 중심으로 설정한 장애물 감지 구역 중 감지된 장애물이 운전자가 조이스틱을 움직이는 방향에 있으면 원격 차량과 장애물 사이의 거리 정보가 운전자에게 전달된다. 조이스틱 제어기는 전달된 거리 정보를 5단계로 나누어 각기 다른 5가지의 전압을 모터에 인가한다. 이것을 이용하여 원격 차량과 장애물과의 거리가 먼 방향부터 운전자가 5단계의 힘(약 → 중약 → 중 → 중강 → 강)을 느끼도록 한다. 반향 힘 생성 알고리즘에 의하여 생성되는 반향 힘의 크기는 5단계의 크기로 구분되는 힘이므로 조이스틱 조작자는 누구나 5단계 힘의 차이를 느낄 수 있다. 그림 4에서 원격 차량

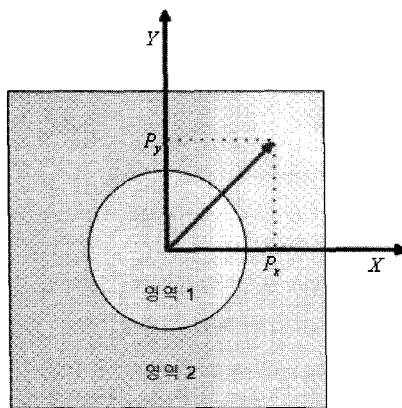


그림 5. 조이스틱 위치 및 영역별 제어 방법.
Fig. 5. Control method for joystick position and area.

과 장애물과의 거리가 가장 먼 영역 5의 경우에는 ‘약’ 세기에 해당하는 전압으로 힘을 재현해 전달하고 영역 2의 경우에는 ‘중강’ 세기에 해당하는 전압으로 힘을 재현해 조이스틱으로 반향 한다. 장애물과 원격 차량의 거리가 가까울수록 (즉, 장애물의 위치가 그림 4의 영역 5에서 영역 1로 갈수록) 큰 전압으로 재현된 힘이 반향 되므로 운전자는 더 큰 힘을 느끼게 된다.

III. 실험

1. 비례미분 제어

본 연구에서는 정확한 원점 제어를 위하여 시스템의 안정성과 성능을 증가시키는 비례미분 제어 기법을 이용하였다. 비례미분 제어가 단순한 비례 제어 보다 얼마나 성능이 우수한가를 보이기 위하여 두 가지 실험을 수행하였다. 본 실험에서는 위치 오류 비례 상수는 $k_p = 1.173$, 속도 오류 비례 상수는 $k_v = 0.001$ 로 설정하였다. 또한 그래프의 ‘position’은 홀 센서를 이용하여 조이스틱 봉의 위치를 측정된 값으로서 제어기 보드의 AD 컨버터로부터 생성된 값을 사용한다. 홀 센서를 이용하여 조이스틱 봉의 위치를 측정된 결과를 참고하면, 조이스틱의 움직임은 x 축, y 축에서 -250에서 250의 AD 컨버터 값을 얻을 수 있는데 이 값에 해당되는 실제 조이스틱의 운동 범위는 원점을 중심으로 x 축, y 축 모두 -1.25cm 에서 1.25cm 까지이다.

그림 6은 비례 제어만 사용 하였을 경우 조이스틱 봉의 원점 제어를 보여준다. $p_x = 170$, $p_y = 80$ 정도의 위치에 있던 조이스틱은 원점 제어 알고리즘에 의해 점점 원점을 향해 이동 하는데 바로 원점에서 수렴하지 못하고 원점을 지나 몇 차례 진동 후 원점에 수렴함을 알 수 있다.

그림 7은 본 연구에서 사용한 비례미분 제어 기법을 이용했을 때의 조이스틱 봉의 원점 제어 결과이다. $p_x = 160$, $p_y = 80$ 정도의 위치에 있던 조이스틱은 반향 된 힘에 의해 점점 원점으로 수렴해 가는데 비례제어를 사용했을 경우와는 달리 원점 주위에서 진동 없이 바로 원점으로 수렴함을 알 수 있다.

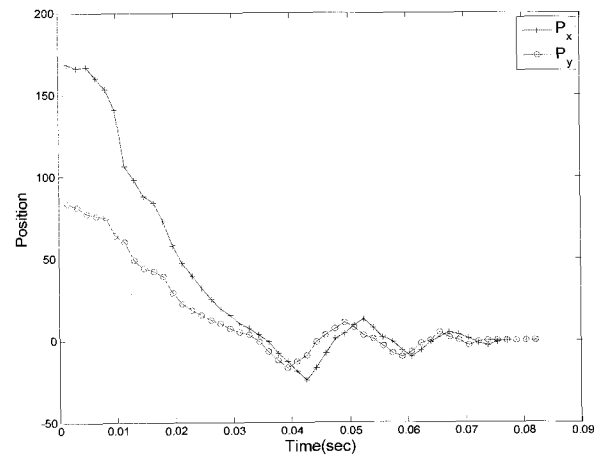


그림 6. 비례 제어.
Fig. 6. Proportional control.

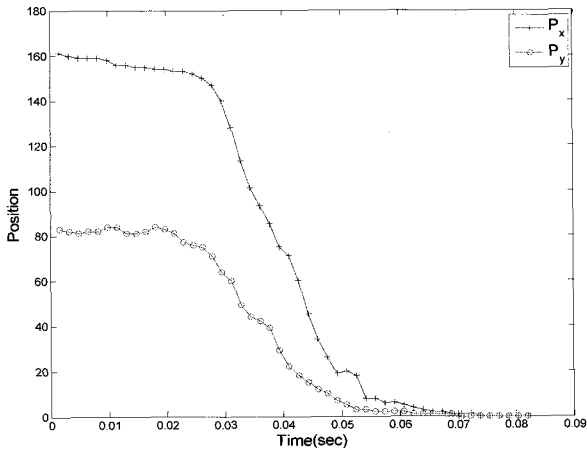


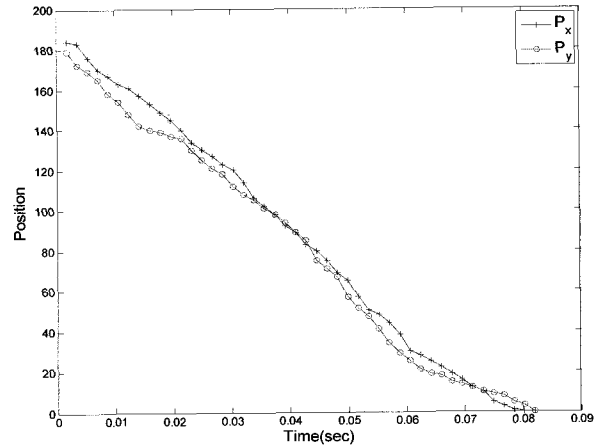
그림 7. 비례미분 제어.
Fig. 7. Proportional-derivative control.

2. 반향 힘 제어

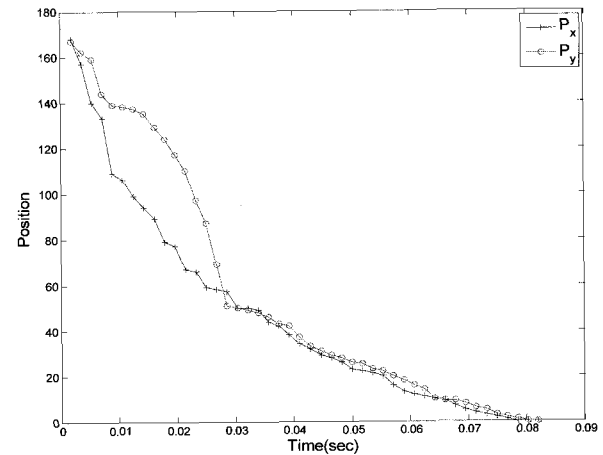
실험에서는 원격지에 있는 원격 차량과 장애물 사이의 거리 정보와 장애물의 방향 정보가 조이스틱 제어기에 주기적으로 전송된다고 가정하였다. 조이스틱을 이용한 원격 차량의 이동 중 조이스틱을 장애물이 있는 방향으로 조작하면 이동 차량은 장애물과의 거리를 실시간으로 제어기로 전송한다. 장애물이 있는 경우에 전송 받은 정보를 토대로 운전자의 조이스틱을 장애물 방향과 반대 방향으로 움직이게 하는 반향 힘을 생성 한다. 두 가지 시나리오에 대하여 실험을 수행하였는데 각각을 (a)와 (b)로 명명하였다. (a)의 경우는 조이스틱을 장애물이 있는 방향으로 조작하고 있고 원격 차량과 장애물과의 거리가 4단계(그림 4의 영역 4)에 해당되는 경우이다. (b)의 경우는 원격 차량과 장애물과의 거리가 3단계(그림 4의 영역 3)에 해당되는 경우이다. 따라서 조이스틱에 반향 되는 힘은 (a)의 경우 그에 상응하는 ‘중약’의 힘이며 (b)의 경우 그에 상응하는 ‘중’의 힘이다. 위치 오류 비례 상수와 속도 오류 비례 상수는 $k_p = 1.173$, $k_v = 0.001$ 로 설정한다. 또한 그림 5의 영역 1의 범위는 홀 센서의 AD 컨버터로부터 생성된 값을 기준으로 설정하였는데 원점을 기준으로 반경 50 이내인 곳으로 정하였다. 조이스틱 위치와 힘에 관한 결과는 아래 그림 8(a), (b)와 그림 9(a), (b)와 같이 나타난다.

그림 8(a), (b)는 시간에 따른 그림 5의 p_x , p_y 조이스틱 위치의 변화를 알려준다. (a)는 원점으로부터 위치가 $p_x = p_y = 200$ 정도인 곳으로 조이스틱을 조작하였고, (b)는 $p_x = p_y = 170$ 정도인 곳으로 조작하였다. 이 때 원격 차량과 장애물 사이의 거리 정보가 제어기로 전송 되고 이를 바탕으로 장애물의 반대 방향으로 재현된 반향 힘에 의해 조이스틱이 점차 원점으로 수렴해 가는 것을 알 수 있다. 약 $p_x = p_y = 50$ 부터는 점점 기울기가 완만해지는 것을 확인할 수 있는데 이것은 조이스틱이 원점 제어 알고리즘이 적용되는 영역 1에 해당되어 영역 2에서 보다 서서히 원점을 향해가기 때문이다.

반향 힘은 조이스틱에 부착된 모터를 이용하여 생성하므로 원격차량과 장애물 거리에 따라 크기가 다른 5단계의 힘



(a)

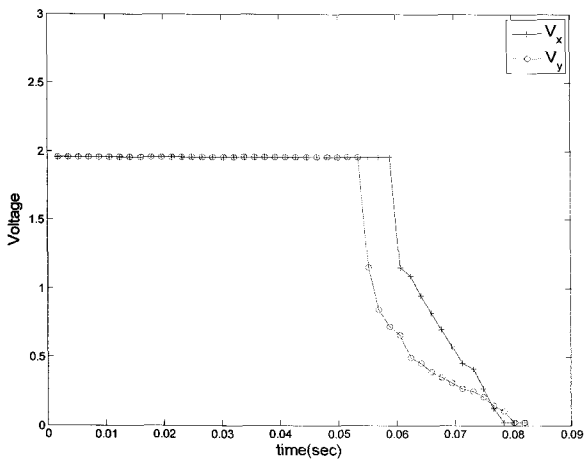


(b)

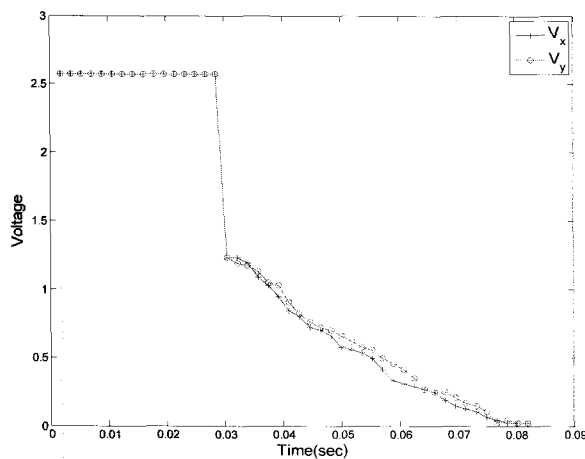
그림 8. 조이스틱 위치.
Fig. 8. Joystick position.

이 올바르게 조작자에게 반향 되는지를 확인하기 위하여 조이스틱에 부착된 모터의 전압을 측정하였다. 그림 9는 원격 차량과 장애물 사이의 거리에 따른 반향 힘을 재현하기 위해 DC모터에 인가되는 전압을 측정할 결과이다. (a)의 경우 원격 차량과 장애물 사이의 거리를 5단계 중 4단계에 해당하도록 설정하였으므로 원점 제어 영역 바깥 부분에서는 조이스틱이 움직이는 방향과 반대 방향으로 ‘중약’ 크기의 힘의 영향을 계속 받으며 조이스틱은 점차 원점을 향하게 되고(그림 8(a)) 원점 제어가 적용되는 영역부터는 원점 제어 알고리즘에 의해 서서히 전압이 감소 하는 것을 알 수 있다. 또한 (b)의 경우 5단계 중 3단계에 해당하는 ‘중’ 크기의 힘으로 원점 제어 영역 바깥 부분에서 조이스틱이 움직이는 반대 방향으로 힘이 작용해 조이스틱이 점차 원점을 향하게 된다(그림 8(b)). 원점 제어가 적용 되는 영역부터 전압은 감소하고 조이스틱이 원점에 가까워짐에 따라 0V로 수렴하며 원점에서는 더 이상 힘이 작용하지 않게 되고 조이스틱이 정지하여 조이스틱은 원점에 위치하게 된다.

따라서 그림 8과 9의 결과로부터 본 연구에서 제안된 햅틱 인터페이스 알고리즘과 원점제어 알고리즘은 원래 목적에 따라 적절하게 동작하고 있다는 결론을 내릴 수 있다.



(a)



(b)

그림 9. 모터에 인가되는 전압.

Fig. 9. Applied voltage to DC motor.

IV. 결론

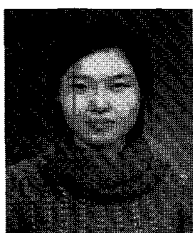
본 연구에서는 원격작업의 효율성을 위해 사용이 증가되고 있는 조이스틱의 햅틱 인터페이스 알고리즘을 구현하였다. 실시간으로 전송되는 원격 차량과 장애물과의 거리 정보를 5단계로 구분하여 이에 따른 반향 힘을 원격 차량과 장애물 사이의 거리에 반비례하도록 5단계로 구현하였다. 조이스틱 봉에 부착된 DC모터에 인가할 수 있는 최대 전압 내에서 5단계의 각기 다른 전압을 설정하고 모터에 전압을 인가하여 반향 힘을 재현해 운전자가 느끼게 함으로써 운전자가 원격지의 장애물의 방향과 거리를 감지할 수 있도록 하였다. 오랜 시간 사용으로 인한 마모, 또는 저가의 DC모터 사용으로 인해 야기되는 부정확한 원격 복귀 문제는 원격 주위 일

정 반경 내에서 비례 미분 제어를 이용한 원점 제어 알고리즘을 따로 적용함으로써 해결하였다. 또한 원격 제어 알고리즘을 통하여 운전자가 조이스틱을 놓치는 등의 오조작으로 인한 원격지 이동 차량의 오동작을 방지하고 운전자가 이동 물체를 조작하고 있지 않을 경우에도 조이스틱이 정밀하게 원점으로 복귀하게 함으로써 안전한 사용을 가능하게 하였다.

촉감을 기본적인 감지 수단으로 이용하는 햅틱 인터페이스를 통하여 인간은 주위 환경과의 상호작용을 쉽고 정밀하게 할 수 있다. 기술의 발전으로 시청각에만 의존하던 인터페이스 기술이 촉감을 이용한 햅틱 인터페이스로 더욱 실감화 되고 있다. 따라서 촉각 햅틱 인터페이스는 시청각 인터페이스가 용이하지 않은 사용자(시/청각 장애인 등)를 위한 대안적 정보 감지 인터페이스로도 사용될 수 있다.

참고문헌

- [1] 김민철, “햅틱 인터페이스의 현재와 미래,” 주간기술동향 통권 1204호, pp. 28-36, 2005.
- [2] S. Weinstein, “Intensive and extensive aspect of tactile sensitivity as a function of body part, sex, and laterality,” *The Skin Sense(Editor : D .R .Kenshalo)*, pp. 195-218, Springfield, 1968.
- [3] 진태석, 임재남, 이장명, “인터넷 환경에서 힘반영을 이용한 이동로봇의 원격제어,” 제어·자동화·시스템공학 회논문지, 제 9권 제 8 호, pp. 585-591, 2003.
- [4] 윤인복, 채영호, “힘 반향을 이용한 속도타원 가상환경 네비게이션 알고리즘 개발,” 한국CAD/CAM학회논문집, 제 9 권 제 4 호, pp. 277-285, 2004.
- [5] 이용혁, 권오상, 김병수, 민흥기, 장원석, 홍승홍, “힘 반향 조이스틱을 이용한 재활보조용 이동 로봇의 제어 기법,” 의공학회지, 제 18 권 제 4 호, pp. 447-456, 1997.
- [6] 김홍철, 강대훈, 이장명, “원격작업의 효율성 향상을 위한 단일 홀센서 비접촉식 전자 조이스틱,” 제어·자동화·시스템공학회논문지, 제 12 권 제 4 호, pp. 358-363, 2006.
- [7] 서세욱, 유봉수, 조중선, “이동로봇의 원격제어를 위한 힘 반향 조이스틱의 개발,” 퍼지및지능시스템학회논문지, 제 13 권 제 1 호, pp. 51-56, 2003.
- [8] J. E. Colgate, P. E. Grafing, M. C. Stanley, and G. Schenkel, “Implementation of stiff virtual walls in force-reflecting interfaces,” *IEEE Virtual Reality Annual International Symposium*, pp. 202-208, 1993.
- [9] C. H. Cho, M. S. Kim, and J. B. Song, “Performance analysis of a 2-link haptic device with electric brakes,” *Proc. of the IEEE Int. Symp. on Haptic Interface and Tele-operator System*, Los Angeles, pp. 47-53, 2003.



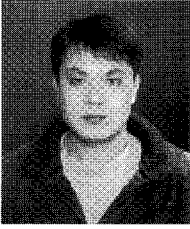
고 애 경

2006년 부산대학교 전자전기통신공학부 졸업. 2006년~현재 부산대학교 대학원 전자공학과 석사과정 재학중. 관심분야는 Embedded System.



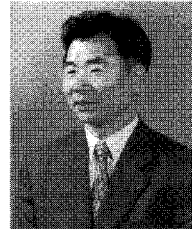
최 준 영

1994년 포항공과대학교 전자전기공학과 졸업. 1996년 동 대학 석사, 2002년 박사. 2005년~현재 부산대학교 전자전기통신공학부 조교수. 관심분야는 비선형 제어 이론, 인터넷 혼잡 제어, 임베디드 시스템, 공장자동화.



김 홍 철

1999년 중국 할빈공업대학교 제어계측 공학과 졸업. 2006년 부산대학교 전자공학과 석사. 2006년~현재 부산대학교 전자공학과 박사과정 재학중. 관심분야는 Manipulator robust control.



이 장 명

1980년 서울대학교 전자공학과 졸업. 1982년 동대학원 석사. 1990년 University of Southern California 전자공학과 졸업(공학박사). 1992년~현재 부산대학교 전자전기통신공학부 교수. 관심분야는 로보틱스, 지능제어.