

## 촉각 정보를 이용한 이동로봇의 원격제어

권용태\*(울산대학교 대학원), 김미경(NARC), 강희준, 노영식(울산대학교)

Remote Control of a Mobile Robot using Haptic Device

Yong- Tae Kweon\*, Mi-Kyung Kim, Hee-Jun Kang, Young-Sik Roh  
(School of Electric, Electronic and Information Engineering, University of Ulsan)

### ABSTRACT

A mobile robot system is developed which is remotely controlled by a haptic master called 'PHANTOM'. The mobile robot has 4 ultrasonic sensors and single CCD camera which detects the distance from a mobile robot to obstacles in the environment and sends this information to a haptic master. For more convenient remote control, haptic rendering process is performed like viscosity forces and obstacle avoidance forces. In order to show the effectiveness of the developed system, we experiment that the mobile robot runs through the maze and the time is checked to complete the path of the maze with/without the haptic information. Through this repeated experiments, haptic information proves to be useful for remote control of a mobile robot.

**Key Words** : Haptic Information(촉각정보), Force Feedback(힘반영), Remote Control (원격제어), a mobile robot(이동로봇), Haptic Rendering

### 1. 서론

무인탐사나 수중탐사, 원자로내부의 청소와 같은 위험하고 복잡한 작업 환경에서 독자적으로 주변환경을 인식하고 작업을 수행, 완료할 수 있는 이동로봇을 만들기 위해서는 이동로봇의 지능화 기술에 대한 많은 연구가 요구된다. 하지만, 이동로봇에 장착된 다양한 센서 정보를 통하여 외부에서 조작자가 주변 환경을 인식하고 판단하여 조작하는 원격 제어 방식의 경우, 기술의 접근이 용이하고, 보다 경제적인 시스템을 구축할 수 있어 많은 연구가 진행되어왔다. 특히, 비전을 이용한 영상정보가 필수적으로 활용되고 있지만, 카메라 영상의 평면 정보로부터 이동로봇 주변의 거리정보를 조작자가 완전히 판단하기는 어려움이 많다. 만약 조작자가 인식하지 못한 장애물이 이동로봇 앞에 나타났다면 조작자가 직진명령을 내려도 이동로봇은 조작자의 명령에 따르지 않고 기본적인 장애물 회피 알고리즘에 따라 정지, 후진, 혹은 회전을 수행하게 되고 조작자는 자신의 명령에 따르지 않는 이동로봇의 동작 때문에 매우 당황하게 될 것이다.

본 논문에서는 기존의 시각정보에 촉각정보를 전

달할 수 있는 이동로봇 원격제어시스템을 구축하고, 이동로봇의 미로주행 실험을 통하여 촉각정보(Haptic Information)의 유용성을 입증하였다. 이동로봇에 부착된 초음파 센서를 이용하여 이동로봇 주변의 장애물과의 거리를 측정된 뒤, 이를 적절한 힘으로 변환하여 조작자에게 촉각 정보의 형태로 제공하여 조작자가 장애물의 존재여부와 거리를 쉽게 파악하게 하여 이동로봇이 안전하고 부드럽게 주행할 수 있도록 하였다. 조작 시스템으로는 PHANTOM premium 1.5 를 사용하였고, 1개 비전 센서 그리고 4 개의 초음파 센서가 부착된 이동로봇(Elegance)은 자체 제작하였다.

또한 조작자의 손떨림이나 오동작을 막기위해 점성힘 알고리즘을 구현하였고, 제한된 초음파 센서의 영향으로 발생하는 급격한 힘의 변화로 인한 조작자의 당혹감을 막기위해 Force Smoothing Algorithm 을 적용하여 부드러운 힘의 변화가 생기게 하였고 미로실험을 통하여 이를 검증하였다.

### 2. 마스터와 이동로봇의 운동변환 관계

햅틱 마스터인 PHANTOM[2]에 그림 1 에 보여진

대로 3 차원 좌표계가 설정하여 마스터의 운동을 표현하고 이동로봇은 2 차원 평면에서 움직이므로 마스터의 3 차원 운동을 x-z 평면에 투영시켜서 평면 좌표값인 x 와 z 축의 좌표값을 원격제어 명령으로 사용한다.

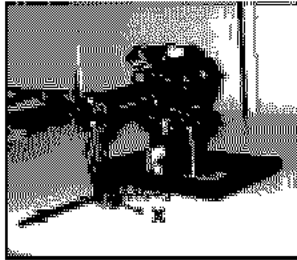


그림 1 햅틱 마스터의 기본 좌표계

그림 2 에 제시된 대로, 마스터의 x, z 좌표값은 이동로봇의 작업환경 환경 내에 이동로봇 운동의 목표점으로 투영되는데, 이동로봇의 원격 조작자의 미세한 손떨림을 통한 이동로봇의 오동작을 막기 위하여, 마스터 운동에 데드존(Dead-Zone)을 설정한다.[1], 설정방법은 프로브의 z 좌표값의 절대값이 임계값 r 보다 작을 경우 이동로봇의 속도는 0 이 되고, x 좌표값의 절대값이 r 보다 작을 경우에는 이동로봇의 조향각은 0 이 되도록 하였다.

이동로봇 작업 환경에 투영된 목표점은 다시 목표점에 도달하기 위한 이동로봇의 운동 인자인 속도와 조향각으로 변환된다. 그 변환식은 식(1),(2)로 나타내었고, 그것을 그래프로 표현한 그림을 그림 3 에 나타내었다.

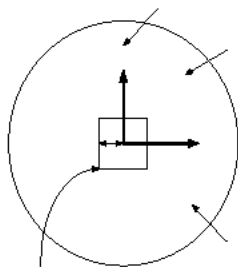


그림 2. 마스터의 변위를 이동로봇 작업 환경으로 투영

$$v = \begin{cases} \frac{2 \cdot v_{\max}}{(z_{\max}-r)^3} (z-r)^3 - \frac{3 \cdot v_{\max}}{(z_{\max}-r)^2} (z-r)^2 & \text{if } (r \leq z \leq z_{\max}) \\ -\frac{2 \cdot v_{\max}}{(z_{\max}-r)^3} (z-r)^3 + \frac{3 \cdot v_{\max}}{(z_{\max}-r)^2} (z-r)^2 & \text{if } (-z_{\max} \leq z \leq -r) \\ 0 & \text{if } (-r < z < r) \end{cases} \quad (1)$$

$$\theta = \begin{cases} \frac{\theta_{\max}}{x_{\max}-r} (x-r) & \text{if } (r \leq x \leq x_{\max}) \\ \frac{\theta_{\max}}{x_{\max}-r} (x+r) & \text{if } (-x_{\max} \leq x \leq -r) \\ 0 & \text{if } (-r < x < r) \end{cases} \quad (2)$$

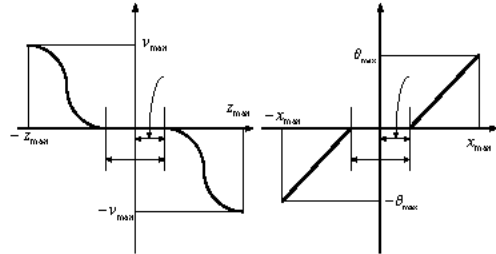


그림 3 속도와 조향각은 운동제적계획

여기에서,  $v_{\max}$  는 이동로봇의 최고 속도,  $z_{\max}$  는 햅틱 프로브의 z 축 방향으로의 최대값,  $\theta_{\max}$  는 이동로봇의 최고 조향각,  $x_{\max}$  는 햅틱 프로브의 x 축 방향으로의 최대값, r 는 햅틱 프로브의 데드존의 양의 축 방향으로의 임계값이다.

속도로의 변환의 경우는 부드러운 모션을 수행하기 위해 3 차 제적생성식을 이용하여 3 차 방정식(cubic function) 곡선의 형태로 변환이 이루어지고, 조향각의 변환은 선형 방정식(linear function)의 형태로 이루어지게 된다. 본 논문에서는 3 차와 1 차 방정식을 이용하였지만 다른 차수의 함수식도 사용이 가능할 것이다.

### 3. 햅틱 랜더링(Haptic Rendering)

햅틱 랜더링(Haptic Rendering), 혹은 햅틱 모델링(Haptic Modeling)은 햅틱 인터페이스(Haptic Interface)에서 가상의 물체, 혹은 실제 물리적인 환경과 물리적 장치사이에서 사실적인 힘(Realistic Force)를 느끼게 하는 데 필요한 일련의 계산적인 모든 과정을 가리킨다[1]. 본 논문에서는 두 종류의 가상힘을 정의하였다. 첫째는 점성힘(Viscosity Force)으로 조작자의 손떨림이나 오동작, 조이스틱의 놓침으로 인한 이동로봇의 오동작을 막기 위한 힘이다. 둘째는 장애물힘(Obstacle Force)으로 이동로봇 주변의 장애물에 대한 위치 정보를 바탕으로 한 힘이다. 또한 장애물의 갑작스런 출현으로 인해 장애물힘의 급격한 변화를 막고 조작자가 부드러운 장애물힘을 느끼게 하기 위한 알고리즘으로 Force Smoothing Algorithm 을 제시한다. 최종적으로 조작자에게 전달되는 전체힘은 점성힘 ( $F_{V,x}, F_{V,z}$ ) 과 장애물힘

$(F_{O,x}, F_{O,z})$  합으로 결정된다.

### 3.1 점성힘(Viscosity Force)의 알고리즘

조작자의 오동작에 의한 오류를 막기 위해 그림 4 와 같은 점성힘(Viscosity Force)을 구현하였다. 앞에서 언급한 여러가지 오동작에 의한 햅틱 프로브의 위치 변화를 막기 위해 햅틱 프로브의 각 축방향으로 점성을 가하여 조작자의 오동작, 손떨림이나 급격한 조작에 의한 햅틱 프로브의 위치 변화를 감소하게 하여 잘못된 명령에 의해 이동로봇의 오동작을 막을 수 있도록 하였다.

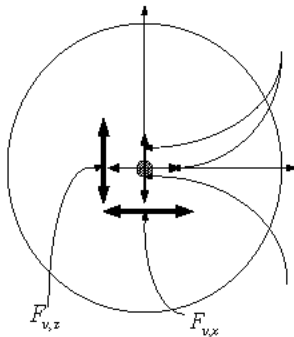


그림 4 점성힘 표현도

점성힘(Viscosity Force)의 관계식은 아래와 같다.

$$F_{V,z} = -\eta \cdot v_z \quad (v_z = \text{velocity of probe at } z\text{-axis})$$

$$F_{V,x} = -\eta \cdot v_x \quad (v_x = \text{velocity of probe at } x\text{-axis}) \quad (3)$$

여기서  $v_z, v_x$ 는 프로브의 각 축방향으로의 속도,  $\eta$ 는 점성률을 의미한다.

### 3.2 장애물힘(Obstacle Force)의 알고리즘

장애물 힘(Obstacle Force)은 이동 로봇과 주변 장애물간의 거리 정보를 조작자에게 힘의 형태로 전달하여 조작자가 로봇 주변의 환경을 촉각으로 느끼게끔 하여 이동 로봇이 이동하는 도중에 주변의 장애물 쪽으로 진행하지 않도록 하는 힘이다. 장애물 회피를 위한 장애물 힘을 생성하는 알고리즘은 참고문헌[3]을 참조하여 본 논문의 환경에 맞게 적용하였다.

### 3.3 Force Smoothing Algorithm

장애물힘에 의해 생성되는 힘은 이동로봇과 이동로봇 주변의 장애물과의 거리에 의해 결정된다. 그림 5 처럼 이동로봇이 좁은 통로를 지나 개월지에 들어선 경우나 주변에 갑작스런 장애물이 나타나는 경우와 같이 장애물과의 거리 변화량이 급격하게 커질 때는 장애물힘도 마찬가지로 급작스럽게 변화하게 된다. 위와 같은 경우에 조작자는 갑작스런

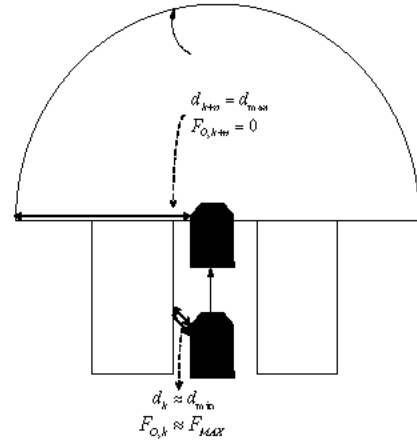


그림 5. 급작스런 장애물힘의 크기 변화의 예

장애물힘의 크기의 변화에 의해 매우 당황하게 되고, 이동로봇에게 적절한 명령을 내리지 못하게 되어 결과적으로 전체시스템이 손상을 입을 수도 있다. 따라서 본 논문에서는 급격한 장애물힘의 변화를 줄이기 위해 Force Smoothing Algorithm을 구현하였다

그림 6 처럼 Force Smoothing Algorithm이 적용이 안된 경우에 장애물 힘이 급격하게 변화하는 경우에는 장애물 힘이 매우 빠른 속도로 조작자에게 전달이 된다. 이를 막기 위해서 본 논문에서 제시한 Force Smoothing Algorithm은 장애물 힘의 변화량이 경계값을 넘어설 때 적당한 기울기로 장애물힘을 증가시키거나 감소시켜서 원하는 장애물힘까지 도달하도록 하여 조작자가 느끼는 장애물힘의 변화가 부드럽게 일어나도록 하였다.

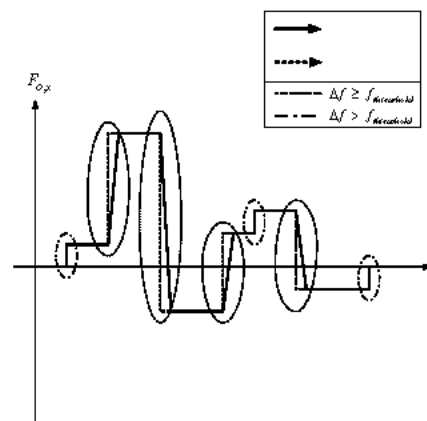


그림 6 Force Smoothing Algorithm의 적용

Force Smoothing Algorithm의 관계식은 아래와 같다.

$$F_{O,x,k+1} = \begin{cases} F_{O,x,k} + (f_{final,x} - F_{O,x,k}) / \Delta t & \text{if } \Delta f_{O,x} > f_{threshold} \\ F_{O,x,k+1} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$F_{O,z,k+1} = \begin{cases} F_{O,z,k} + (f_{final,z} - F_{O,z,k}) / \Delta t & \text{if } \Delta f_{O,z} > f_{threshold} \\ F_{O,z,k+1} & \text{otherwise} \end{cases} \quad (4)$$

여기서  $f_{threshold}$  는 장애물힘의 변화량의 경계값,  $f_{final}$  은 원하는 장애물힘,  $\Delta t$  는 장애물힘의 변화 구간 시간을 의미한다.

#### 4. 실험

앞에서 제시된 알고리즘 및 구성시스템의 유효성을 보이기 위하여 이동로봇의 미로 통과 실험을 수행하였다. 구성시스템은 그림 7 과 같다. 햅틱 장치는 host computer 에 연결되어 조작자의 조작에 의한 햅틱 프로브의 좌표값이 host computer 에 전달되고, host computer 는 이 좌표값을 이동로봇의 모션 파라미터로 변환하여 RS-232 통신을 이용하여 이동로봇에 전달한다. 이동로봇은 host computer 로부터 받은 모션에 따라 미로 내부를 주행을 하게 되고, 이동로봇에 장착된 초음파 센서를 이용하여 거리 정보를 얻은 뒤 RS-232 통신을 이용해 host computer 로 전달하게 된다. host computer 는 전달된 거리 정보를 힘의 정보로 변환한 뒤 햅틱 장치를 이용해 조작자에게 전달하게 된다. 조작자는 이 힘 정보와 카메라에 의한 영상정보를 이용하여 이동로봇을 조작하게 된다. 보여진 미로는 폭 30cm, 길이 3m 의 굴곡이 진 형태로 제작하였다

본 실험에서는 햅틱 렌더링을 위한 3 가지 경우에

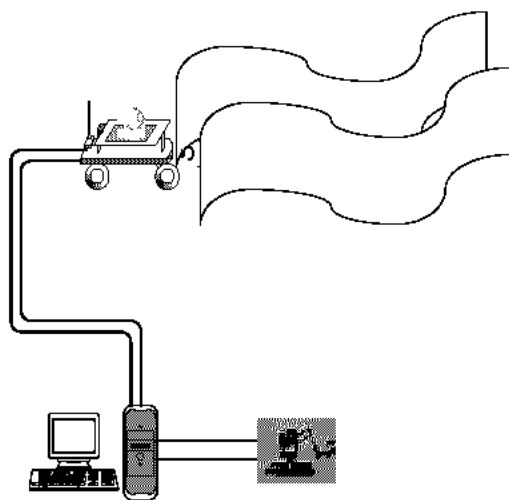


그림 7 시스템 구성도

대하여 각각 실험을 하여 그 결과를 얻었다. 첫번째는 힘반향이 안된 경우(NF : No Force Feedback), 두번째는 점성힘과 장애물힘이 적용된 경우(OVF : Obstacle & Viscosity Force Feedback), 세번째는 점성힘과 Force Smoothing Algorithm 이 적용된 장애물힘이 적용된 경우(FSA : Force Smoothing Algorithm)이다.

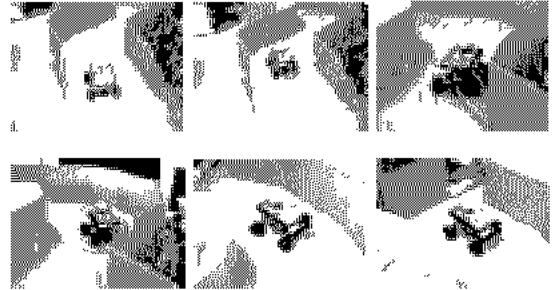


그림 7 미로통과를 위한 이동 로봇 원격제어

그림 7 은 이동로봇의 미로통과 실험장면을 보여 주고, 그림 8 은 점성힘과 장애물힘이 적용된 경우(OVF)와 점성힘과 Force Smoothing Algorithm 이 적용된 장애물힘을 적용한 경우(FSA)에 조작자에게 전달되는 각 축 방향으로의 힘을 그래프로 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 OVF 의 경우에는 힘의 변화가 진동이 발생하며 급격하게 일어나는 것을 알 수 있다. 반면에 FSA 의 경우는 급격한 힘의 변화가 거의 발생하지 않고 힘의 변화가 부드럽게 이루어 짐을 알 수 있다. 제시하지는 않았지만, 힘 반영이 안된 경우(NF)와 OVF 와 FSA 의 경우에 이동로봇의 속도와 조향각의 변화를 살펴보면, NF 의 경우에 이동로봇의 조작자가 충돌을 막기위해 이동로봇을 후진 시킨 후 다시 전진하는 경우가 많이 발생하고, 반면에 힘 반영이 된 경우(OVF, FSA)

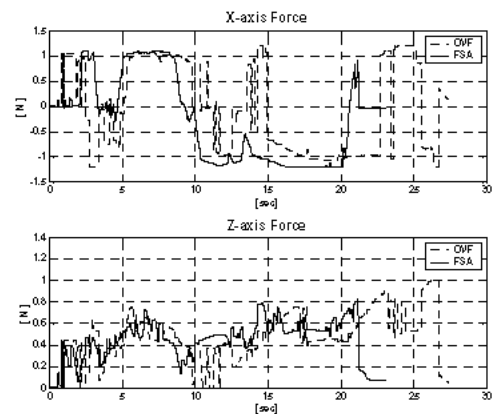


그림 8 조작자에게 전달되는 힘의 비교

의 경우에는 후진 하는 경우 없이 거의 일정한 속도를 유지하며 이동로봇이 주행함을 알 수 있다. 조향각 관찰을 통해서 NF 와 OVF 의 경우에는 조향각의 급격한 변화가 일어나는 구간이 많이 발생하는 반면, FSA 의 경우에는 조향각의 급격한 변화가 거의 없이 매우 부드럽게 변화함을 알 수 있다.

Table 2 이동로봇의 주행 시간의 비교

Haptic Rendering	NF	OVF	FSA
Time (sec)	31.5	27.42	23.09

Table 2는 각각의 Haptic Rendering 에 따른 이동로봇의 미로를 통과하는데 걸린 주행시간을 비교한 것이다. 표에서 알 수 있듯이 NF 의 경우에는 이동로봇 주변의 장애물에 대한 정보가 부족하므로 충돌 및 후진, 급격한 방향전환을 을 하게 되어 주행 시간이 매우 길게 나왔다. 반면에 OVF 의 경우에는 NF 의 경우보다 주행시간이 짧게 나왔지만 부드러운 방향 전환이 이루어 지지 않아 FSA 의 경우보다 주행시간이 더 오래 걸렸다. FSA 의 경우에는 주변의 장애물에 대한 정보가 조작자에게 충분히 전달되고 Force Smoothing Algorithm 을 통한 부드러운 힘 반향의 구현을 통해 이동로봇의 부드럽고 안전한 주행을 이루어져 결과적으로 주행시간을 단축하게 되었다.

## 6. 결론 및 향후과제

본 논문에서는 햅틱 장치를 이용하여 이동로봇의 힘 반영 제어를 통해 부드럽고 안전한 이동로봇의 주행을 위한 방법과 실험을 통한 실제 구현과 유효성을 검증하였다.

힘 반영이 없이 카메라 정보만을 이용한 경우와 카메라 정보와 이동로봇 주변의 환경 정보를 변환한 장애물힘 정보를 이용한 경우, 그리고 카메라 정보와 급격한 힘 변화를 막기위한 Force Smoothing Algorithm 을 적용한 장애물힘을 정보를 이용한 경우에 대하여 동일한 미로 내에서 주행을 한 뒤 그 결과를 비교하였다.

본 논문에서는 계산식에 사용된 gain 값, 최대 회피 반경, dead zone 영역의 반경, 힘의 최대값 등을 주변환경에 맞추기 위해 여러 번의 반복 주행을 통해 결정하였다. 앞으로는 이런 gain 값들이나, 최대 회피 반경, dead zone 영역의 반경, 힘의 최대값 등을 학습을 통해 습득할 수 있는 지능시스템의 개발이 필요하다. 또한 Force Smoothing Algorithm 의 성능

개선과 무선통신을 통한 이동로봇의 원격제어 구현이 차기 개발 과제로 남게 될 것이다.

## 후 기

본 연구는 한국과학재단 지정 울산대학교 네트워크 기반 자동화 연구센터의 지원을 받아 수행하였고, 지원에 감사드립니다

## 참고 문헌

- [1] Spyros G. Tzafestas, Costas S. Tzafestas, "Virtual Reality in Telerobotics: The state-of-the-art", Industrial Electronics, 1999. ISIE '99. *Proceedings of the IEEE International Symposium*, Volume: 1, 12-16 July 1999.
- [2] SensAble Technologies, PHANTOM. [http://www.sensable.com/products/phantom\\_ghost/phantom.asp](http://www.sensable.com/products/phantom_ghost/phantom.asp)
- [3] Sangyoon Lee, Gaurav S. Sukhatne, Gerard Jounghyun Kim, Chan-Mo Park, "Haptic Control of a Mobile Robot: A User Study." *Proceeding of the 2002 IEEE/RSJ Intl. Conference on Intelligent Robots and Systems EPFL*, Lausanne, Switzerland. October 2002.
- [4] Steven E. Butner, "A Real Time System for Telesurgery", *IEEE ICRA1998*, pp. 236-243
- [5] Dong-Soo Kwon, Ki-Uk Kyung, "Realistic Force Reflection for a Spine Biopsy Simulator", *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA2001)*, Seoul, vol.3 pp1358-1363, May 2001.
- [6] Dong-hyuk Cha, Hyung Suck Cho, "A Neurofuzzy Algorithm-Based Advanced Bilateral Controller for Telerobot Systems" *Transaction on Control, Automation and Systems Engineering 2002*, pp.100-107.
- [7] Ming Ouhyoung; Wu-Nan Tsai; Ming-Chang Tsai; Jiann-Rong Wu; Chung-Hsi Huang; Tzong-Jer Yang; "A low-cost force feedback joystick and its use in PC video games" *Consumer Electronics, IEEE Transactions on*, Volume: 41 Issue: 3, Aug. 1995 Page(s): 787-794