

가상임피던스를 이용한 원격 이동로봇의 장애물회피

Obstacle avoidance of Mobile Robot with Virtual Impedance

진태석*

TaeSeok Jin

* 동서대학교 메카트로닉스공학과

요 약

본 논문에서는 Virtual Mass-Spring-Damper 모델을 사용하여 이동로봇과 주위 물체와의 관계를 모델링하고 장애물의 충돌벡터를 검출하여 가상의 척력을 발생시키는 가상 임피던스 방법을 제안하였다. 이를 위하여 원격지 슬레이브 로봇의 주위 환경 정보 즉, 이동 로봇과 장애물과의 거리 및 접근 속도 등의 정보를 조작자에게 입체적으로 전달하기 위해 조이스틱의 각축에 연결된 모터를 이용하여 힘을 발생시킬 수 있도록 한다. 제안한 방법의 실제 로봇적용에 앞서 이동로봇의 장애물 회피 시뮬레이션을 통하여 알고리즘을 검증하였다.

키워드 : 인터넷기반제어, 원격제어, 힘반영, 이동로봇, 장애물회피

Abstract

In this paper, a virtual force is generated and fed back to the operator to make the teleoperation more reliable, which reflects the relationship between a slave robot and an uncertain remote environment as a form of an impedance. In general, for the teleoperation, the teleoperated mobile robot takes pictures of the remote environment and sends the visual information back to the operator over the Internet. Because of the limitations of communication bandwidth and narrow view-angles of camera, it is not possible to watch certain regions, for examples, the shadow and curved areas. To overcome this problem, a virtual force is generated according to both the distance between the obstacle and the robot and the approaching velocity of the obstacle *w.r.t* the collision vector based on the ultrasonic sensor data. This virtual force is transferred back to the master (two degrees of freedom joystick) over the Internet to enable a human operator to estimate the position of obstacle at the remote site. By holding this master, in spite of limited visual information, the operator can feel the spatial sense against the remote environment. It is demonstrated by experiments that this collision vector based haptic reflection improves the performance of teleoperated mobile robot significantly.

Key Words : Internet based control, Teleoperation, Force reflection, Mobile robot, Obstacle avoidance

1. 서 론

원격제어 분야에서 중요하게 다루어지는 원격 존재 감이란 원격제어의 궁극적인 목표로, 원격 조작자와 작업 환경에 대한 정보가 인간에게 전달되는 이상적인 상황이다. 그것을 실현하는 가장 보편적인 방법은 원격 환경의 정보를 화상을 통하여 피드백하는 방법이다. 그러나 이런 방법은 인간의 세심한 조작 능력이 보다 요구되어지는 분야에서는 충분하지 않다. 즉, 원격수술 같은 응용에선 화상 정보 이외에 슬레이브 로봇과 물체의 접촉힘과 같은 또 다른 정보를 필요로 하게 된다.

원격제어 분야에서 양방향 제어(bilateral control) 방법은 마스터측에서 슬레이브 측으로 정보를 전달 하는 것처럼 슬레이브 측에서도 마스터의 조작자 측으로 정보를 전달해주는 형태의 원격제어를 의미하며, 접촉 힘 정보를 활용하여 원격로봇의 위치 혹은 속도를 제어하기 위해서 사용된다. 여기서의 정보는 물리적 형태의 정보(힘, 촉각, 등)를

의미하며, 일반적으로 힘반영이 제공되는 원격제어를 일컫는다. 즉, 양방향 제어에서 사용되는 입력은 위치나 속도(혹은 조작자의 접촉힘)가 되며, 출력은 원격로봇의 접촉힘이 된다[1-3].

양방향의 제어에 관한 기존의 연구에선 주로 전송 지연 및 대역폭의 한계를 극복하고 원격지의 ARM로봇 과 환경사이의 접촉 힘을 마스터 측의 조종자에게 정확히 복원시킴으로써 조종자로 하여금 시각적인 정보이외에 촉각의 정보를 이용한 보다 정밀한 제어 능력을 부여하는 것이 주된 목적이다[4]. 따라서, 이동로봇과 장애물과의 접촉이 일반적으로 발생하지 않는 원격이동로봇에 관한 연구에선 힘 반영을 이용한 양방향 제어는 몇몇 연구들[5-8]을 제외하곤 찾아보기 힘들다.

본 논문에서는 슬레이브 측의 이동로봇과 마스터 측의 2 자유도 조이스틱을 인터넷 기반하에서 제어하기 위하여 이동로봇과 환경사이의 정보를 가상의 힘으로 표현하여 이것을 마스터 측으로 피드백 시키는 양방향 제어에 관하여 연구한다. 조작자, 마스터 조이스틱(Joystick), 통신블록, 슬레이브 로봇으로 구성되는 마스터 슬레이브 시스템을 그림 1과 같이 구성한다.

원격지 슬레이브 로봇의 주위 환경 정보 즉, 이동 로봇과

접수일자 : 2009년 4월 3일

완료일자 : 2009년 6월 20일

장애물과의 거리 및 접근 속도 등의 정보를 조작자에게 입체적으로 전달하기 위해 조이스틱의 각축에 연결된 모터를 이용하여 힘을 발생시킬 수 있도록 한다. 조작자는 전송채널의 전송지연이나 대역폭의 제약 및 카메라의 물리적인 고장 등으로 인하여 발생하는 영상정보의 한계상황에서도 조이스틱을 통해 느껴지는 힘에 기인하여 주행하는 로봇과 영상으로는 보이지 않는 물체들과의 거리를 인지할 수 있다 [9-11]. 본 논문에서는 Virtual Spring-Damper 모델을 사용하여 이동로봇과 주위 물체와의 관계를 모델링하고 장애물의 충돌벡터를 검출하여 가상의 척력을 발생 시켜 국부 최소점에 도달할 가능성을 현저히 줄인 가상 임피던스 방법을 제안한다.

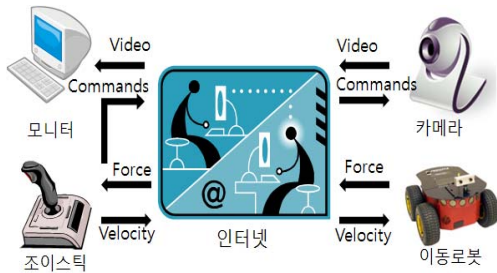


그림 1. 시스템의 블록 다이어그램
Fig. 1. Block diagram of the system.

2. 시스템의 구성

본 논문에서는 조작자(Human Operator), 마스터 조이스틱, Local PC, Remote PC, 슬레이브 로봇 그리고 통신블록으로 구성되는 마스터-슬레이브 시스템을 그림 2와 같이 구성한다. 조작자가 조이스틱에 힘 F_h 를 가하면, X_m 만큼 조이스틱의 변위가 발생 되고, Local PC는 그 변위에 따라 X_d, V_d 를 생성하여 인터넷을 통하여 Remote PC측으로 전달한다. 슬레이브 이동로봇이 Remote PC로부터 무선랜을 통하여 X_d, V_d 를 받게 되면, 이동로봇의 LAP(Local Avoidance Plan-ner)가 그에 해당하는 인력과 초음파 센서를 통한 주위 장애물과의 척력을 구하여 로봇의 가속도, \ddot{x}_d 를 생성한다. 이 \ddot{x}_d 는 Servo Driver에 전달되어, 이동로봇이 조작자 에 의한Reference Point를 추종 해가며 장애물을 회피할 수 있도록 하는 이동로봇의 제어 입력 u 와 ω 를 생성하게 된다. 이 때 장애물과의 척력, F_b 는 화면 정보와 함께 조작자에게 다시 피드백되어 Local측의 조종자에게 원격 조작감을 실현하도록 한다.

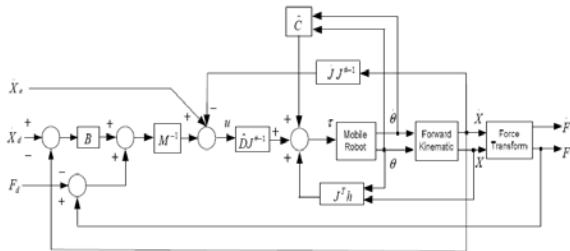


그림 2. 전체 시스템 구성도
Fig. 2. The total system architecture.

2.1 마스터 조이스틱

조종자가 원격지의 이동로봇과 로봇의 주위 환경 간에서 발생하는 가상의 힘을 느끼고, 로봇에게 명령 을 주기 위해서 힘 반영이 가능한 2자유도 조이스틱 시스템을 구현한다 [12]. 그림 3은 본 논문에서 구현한 조이스틱 시스템의 블록도이다. 여기서, 조이스틱을 제어하기 위하여 제어기는 마이크로 프로세서(AVR128)를 사용한다. 이것은 마스터 측의 PC에서 보내온 힘 정보(F_x, F_y)를 받아서 이 힘을 작업자에게 느끼게 하기 위하여 F_x, F_y 에 해당하는 PWM(Pulse Width Modulation) 출력을 내어 각 축의 DC 모터를 구동한다. 여기서, DC 모터를 구동하기 위하여 L298N DC모터 드라이브를 사용한다.

조이스틱의 위치를 측정하기 위하여 각 축의 모터에 Potentiometer를 장착하여, 위치를 10비트로 A/D (Analog to Digital) 변환하여 조이스틱 제어기 입력으로 사용하며 작업자가 조이스틱을 잡고 있는 힘을 측정하기 위하여 전류 센서를 사용한다. 또한, 각각의 모터에 흐르는 전류를 2 Ω 의 저항과 LPF(Low Pass Filter)를 사용하여 전압으로 변환한 후, 10비트 A/D변환하여 조이스틱 제어기 입력으로 사용한다.

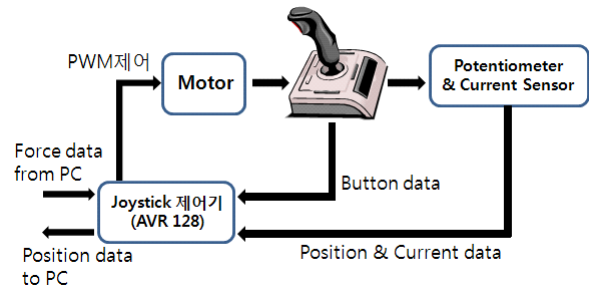


그림 3. 조이스틱 시스템의 블록도
Fig. 3. Block diagram of a joystick system.

조작자의 지령치 획득

그림 4에서와 같이 조종자가 F_h 로 조이스틱에 힘을 가하게 되면 조이스틱의 위치 좌표에 X_m 만큼의 변위를 발생시키게 된다. 이렇게 발생된 변위 X_m 는 다음식에 의해서 속도 V_d 와 위치 X_d 를 생성하게 된다.

$$V_d(s) = K_m \cdot X_m(s) \quad (1)$$

$$1. \quad X_d(s) = K_v \cdot V_d(s) \cdot ds \quad (2)$$

여기서, K_m 과 K_v 는 속도 및 가속도 계산을 위한 변화율을 상수로 표시한 스켈링 상수이고, ds 는 제어장치의 제어 연산처리 제어주기이다. 이렇게 생성된 X_d 와 V_d 는 다음 Reference Point의 위치와 속도로 활용된다.

가상의 힘의 복원

조종자에게 피드백 되어질 가상의 힘 F_b 는 다음과 같이 표현된다.

$$F_b = \sum_{i_{od}=0}^{n_{od}} F_{od}(s) + \sum_{i_{os}=0}^{n_{os}} F_{os}(s) \quad (3)$$

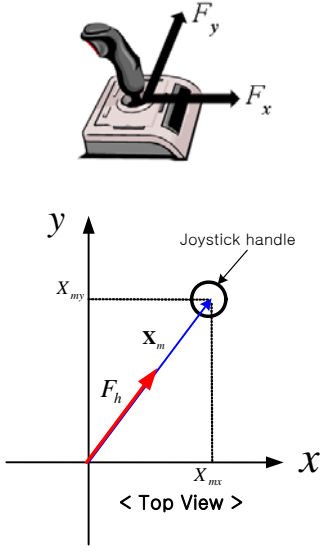


그림 4. 조이스틱의 축과 좌표계
Fig. 4. Joystick axis and coordinates.

여기서 $F_{od}(s)$ 는 동적 장애물에 대한 척력을 나타내고 $F_{od}(s)$ 는 정적 장애물에 대한 척력을 나타낸다. 결국 F_b 는 장애물에 대한 척력의 합을 나타낸다. 결국, 피드백되는 데이터 즉, $F_b(=F_s-F_m)$ 는 실제 로봇이 받는 힘 F_s (혹은 V_s)와 조종자의 지령값 F_m (혹은 V_m)의 차이가 된다. 슬래이브 측의 이동 로봇에서 발생되어진 F_b 는 식(4)에 의해서 마스터 측의 조종자에게 전해지게 된다.

$$\tau_b(s) = \text{sat}(K_b \cdot F_b(s)) \quad (4)$$

$$\text{sat}(x) = \begin{cases} x & , \text{ if } |x| \leq x_{\max} \\ \text{sgn}(x) \cdot x_{\max} & , \text{ otherwise} \end{cases} \quad (5)$$

여기서, K_b 는 힘 케환 이득(force feedback gain) 상수이다.

조작자는 전송채널의 전송지연이나 대역폭의 제약 및 카메라의 물리적인 고장 등으로 인하여 발생하는 영상정보의 한계상황에서도 조이스틱을 통해 느껴지는 τ_b 에 의해서 주행하는 로봇과 영상으로는 인지할 수 없는 물체들과의 거리를 느낄 수 있다.

2.2 슬래이브 이동로봇

본 논문에서의 원격지 슬래이브 로봇으로 이동 로봇을 사용한다. 마스터측 조종자의 의지가 어떻게 원격지의 이동 로봇에서 반영되는지를 좌표계 변환을 통하여 설명한다.

원격지의 이동로봇은 조종자에 의해서 생성된 Reference Point를 추종해가며 실시간 장애물 회피를 수행하게 된다. 아래 식(6)과 식(7)은 마스터에서 전달되어진 $X_d(s)$, $V_d(s)$ 와 로봇의 Reference Point $X_r(s)$ 및 $X_r(s)$ 과의 관계를 나타내고 있다.

$$\begin{bmatrix} \dot{X}_{rx}(s) \\ \dot{X}_{ry}(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{dx}(s) \\ V_{dy}(s) \end{bmatrix} \quad (6)$$

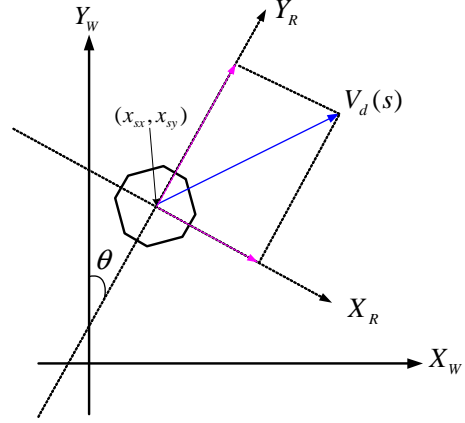


그림 5. Reference Point 생성
Fig. 5. Generation of the reference point.

$$\begin{bmatrix} X_{rx}(s) \\ X_{ry}(s) \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta & x_{sx}(s) \\ -\sin\theta & \cos\theta & x_{sy}(s) \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_{dx}(s) \\ X_{dy}(s) \\ 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

여기서 $x_s(s)$ 는 현재 로봇의 좌표, $X_r(s)$ 는 이동로봇의 기준점(Reference point)에 대한 x, y 위치를 나타낸다.

3. 가상임피던스기반 장애물 회피

초음파 센서를 사용하여 이동로봇과 주위 물체와의 거리 측정하는 경우, 장애물의 표면에 수직인 백터와 초음파 센서의 빔이 이루는 각이 30도 이상일 때는 초음파 센서의 방향 부정확성, 반사각 민감성 및 외란 민감성에 의해서 정확한 거리 정보를 얻지 못하게 된다. 따라서 본 논문에서는 이동로봇의 중심을 향하고 장애물의 접선에 수직인 백터를 충돌 백터(C)로 정의하고, 30도 이내의 비교적 정확한 거리 정보들을 이용하여 장애물에 대한 충돌백터를 검출하고 이 백터에 의해 가상의 척력을 구하는 가상 임피던스 방법을 제안한다.

3.1 가상 임피던스 방법

임피던스 제어란 불확실한 환경과 로봇과의 상호작용을 임피던스로 모델링하여 피드백되는 힘에 의해 위치를 조정하며 일정한 힘을 유지해 나가는 알고리즘이다[12]. 참고문헌 [13]의 가상 임피던스 방법 (Virtual Impedance Method)은 일반적인 임피던스 알고리즘을 이동로봇의 주행 및 충돌회피 분야에 적용한 것이다. 그림 6에서와 같이 가상 임피던스 방법은 로봇과 Reference Point, 그리고 로봇과 장애물과의 관계를 스프링(Spring)과 댐퍼(Damper)로 모델링하여 거리 및 속도 정보에 따라 가상의 힘을 생성시키는 방법이다. 즉, GPP(Global Path Planner)가 Reference

point들로 구성되는 궤적 $X(t)$, $\dot{X}(t)$ 를 생성하면, 그 주어진 Reference point에서 로봇과 물체사이의 거리에 기인한 가상의 힘을 발생시켜 주어진 궤적으로부터 이탈을 허용하는 로봇의 가속도 \ddot{x} 를 구하는 방법이다. 그림 6에서 가상 임피던스 방법으로 모델링하여 얻은 이동로봇의 운동 방정식은 다음과 같다.

$$\ddot{x}_s = \frac{1}{M_s} \{F_m + \sum_{i=0}^{n_{od}} F_o\} \quad (8)$$

식(8)에서, F_m 은 현재 로봇의 위치 x 와 Reference Point X 와의 가상의 인력으로서, F_m 은 다음의 식에 의해서 생성된다.

$$\begin{aligned} F_m &= K_r(X_{r,s}) + D_r(\dot{X}_{r,s}) \\ &= -K_r(x_s - X_r) - D_r(\dot{x}_s - \dot{X}_r) \end{aligned} \quad (9)$$

여기서, K_r 는 현재 로봇의 위치 X_s 와 Reference Point X_r 사이에서 작용하는 스프링 상수이며, D_r 는 현재 로봇의 속도 \dot{x}_s 와 Reference Point에서의 속도 \dot{X}_r 사이의 댐핑 상수이다. 그리고, F_o 는 현재 로봇의 위치 x_s 와 장애물 사이의 가상의 척력을 나타낸다. 가상의 척력들의 합은 식(10)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} F_o &= K_o(X_{s,o}) + D_o(\dot{X}_{s,o}) \\ &= \sum_{i=0}^n \{K_o(x_s - x_{oi}) + D_o(\dot{x}_s - \dot{x}_{oi})\} \end{aligned} \quad (10)$$

여기서, K_o 와 D_o 는 각각 장애물과 로봇의 거리에 따른 스프링 상수와, 속도에 따른 댐핑 상수이다. 식(1)에서 M_s 는 로봇의 실제 중량을 의미하는 것이 아니라, 로봇의 궤적의 상대적인 변화율을 조절하게 되는 인자가 된다. 즉, M_s 를 크게 하면 로봇이 원래의 궤적을 이탈하게 되는 변화율이 감소하게 되고, M_s 를 줄이게 되면 그 변화율이 커지게 됨을 의미한다. 따라서, 장애물과 충돌하지 않는 범위내에서 보다 큰 M_s 를 갖는 이동로봇은 보다 좋은 성능을 갖게 된다.

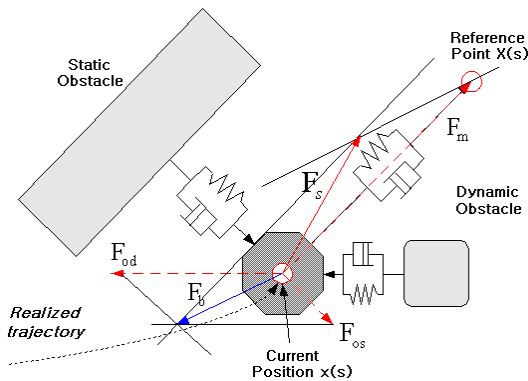


그림 6. 가상 임피던스 방법
Fig. 6. Virtual impedance Method

본 논문에서와 같이 제어 주기가 긴 원격제어 분야에서는 이동로봇의 실시간 충돌회피가 요구된다. 따라서 앞에서 언급한 바와 같이 장애물의 접근속도를 고려하는 가상 임피던스 방법이 일반적인 PFM에 비해 적합하다. 그리고 일반적인 가상 임피던스 방법에서 이동로봇과 장애물들간의 속도차로서 Damper를 정의하는 것과 달리 그 거리의 변화분(즉, 접근속도)으로 Damper를 정의하는 새로운 가상 임피던스 방법을 제안하였다. 제안된 가상 임피던스 방법에 의해서 식(10)은 다음과 같이 수정되어 진다.

$$\begin{aligned} F_o(s) &= K_{s,o}(X_{s,o}(s)) + D_{s,o}(\dot{X}_{s,o}(s)) \\ &= \begin{cases} \sum_{i=0}^n \{K_{s,o}(\rho_0 - \|d_i\|) \frac{d_i}{\|d_i\|} - D_{s,o}(\Delta(d_i)) \frac{d_i}{\|d_i\|}\}, & \text{when } \|d_i\| < \rho_0 \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \end{aligned} \quad (11)$$

여기서, $\Delta(d_i) = d_i[n] - d_i[n-1]$, ρ_0 는 초음파 센서의 거리 측정 가능범위이며, d_i 는 거리 벡터로서 $d_i = x_s - x_{oi}$ 이다.

3.2 장애물 회피 시뮬레이션

제한한 가상 임피던스 방법의 효용성을 검증하기 위하여 다음과 같이 시뮬레이션을 수행하였다. 그림 7은 식(10)과 같이 일반적인 가상 임피던스 방법[14,15]을 이용하여 시뮬레이션한 결과이다. 이동로봇과 장애물의 속도의 차로 정의된 Damper는 장애물과의 충돌위험시 로봇의 진행방향의 역방향으로 작용하게 되어 로봇의 속도를 감소시키는 역할을 하게 된다. 하지만, 회피 후에도 여전히 Damper의 영향으로 장애물 주위에서 큰 시간 지연과 slack이 발생할 수 있다. 그림 8은 제안된 방법 즉, 식 (11)을 이용하여 이동로봇의 장애물 회피 Motion Planning을 시뮬레이션한 결과이다. 거리의 변화분으로 정의된 Damper는 접근하는 장애물에 대하여 충돌 이전에 이동로봇의 감속과 함께 경로변경을 야기시킨다. 그리고 회피 후에는 로봇을 감속시키는 역할 대신 주어진 궤적에서 이탈하지 못하도록 하는 역할을 하게 된다. 그림 8은 다음과 같은 조건($K_r=2$, $D_r=10$, $K_o=10$, $D_o=15$, $M_s=10$)에서 운동장애물에 대하여 시뮬레이션한 결과이다. 운동장애물에 대해서도 역시 제안된 방법이 유용함을 알 수 있다.

또한 그림 8에서의 보여준 이동로봇의 주행 결과에 대한 x, y, theta 값을 각각 그림 9에서 제시하였다.

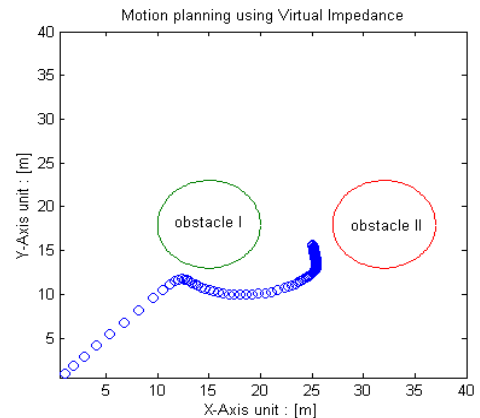


그림 7. 일반적인 가상 임피던스 방법
Fig. 7. A normal virtual impedance method

4. 결론

본 논문에서는 원격제어 환경에서 생성된 궤적 추종 및 실시간 장애물 회피를 위한 새로운 가상 임피던스 방법을 제안하였다. 제안된 가상 임피던스 방법에서, 가상의 힘은 장애물에 대한 충돌벡터를 측정하여 이동로봇 사이의 거리 및 장애물의 접근속도에 따라 척력이 생성되어 인터넷망을 통해 원격지에 있는 조작자에게 전달된다.

힘 반영 조이스틱에 의해서 재생된 가상의 힘을 인식하여 조작자가 원격지의 장애물 위치를 추정할 수 있으며 그에 따라 장애물 회피지령을 효율적으로 내려줄 수 있음을 시뮬레이션을 통해 검증 해 보였다. 제안된 방법을 이용하면 조작자는 제한된 영상정보 하에서도 원격지의 주위 환경을 입체적, 공간적으로 인지할 수 있게 되어 보다 나은 원격 이동로봇의 제어성 및 안정성을 얻을 수 있다는 것을 알 수 있으며 향후 이동로봇의 원격제어를 위한 유용한 기법으로 활용될 수 있다. 향후과제로 시뮬레이션 상에서 구현한 알고리즘을 실제 로봇 시스템에 적용하여 실험하여 검증하고자 한다.

참고 문헌

- [1] Hassan-Zadeh, Janabi-Sharifi, Yang A.X., "Internet-based teleoperation of a mobile robot using shared impedance control scheme: a pilot study" *Proc. of the IEEE Conference on Control Applications*, pp.346-351, 2005.
- [2] Takemori, F., Tomita, N., Kushida, D., Kitamura, A., "Mobility of legged robot by non-contact impedance control" *Advanced Intelligent Mechatronics, IEEE/ASME International Conference on*, pp.395-399, July 2008
- [3] D. A. Lawrence, "Stability and Transparency in Bilateral Teleoperation," *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, vol. 9, no. 5, pp. 624-637, 1993.
- [4] S. H. Lee and H. S. Lee, "Modeling, Design, and Evaluation of Advanced Teleoperator Control System with Short Time Delay," *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, vol. 9, no. 5, pp. 607-623, 1993.
- [5] S. S. Lee and J. M. Lee, "Haptic interface design for the tele-surgery," *Proc. of the CIDAM Workshop on Service Automation and Robotics*, Hong Kong, pp. 81-91, June 19-20, 2000.
- [6] J. Borenstein and Y. Koren, "Teleautonomous Guidance for Mobile Robots," *IEEE Trans. on System, Man and Cybernetics*, vol.20, no.6, pp. 1437 - 1443, 1990.
- [7] S. G. Hong, J. J. Lee, and S. H. Kim, "Generating Artificial Force for Feedback Control of Teleoperated Mobile Robots," *Proc. of IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, vol.3, pp. 1721-1726, 1999.
- [8] I. Elhajj, N. Xi, W. K. Fung, Y. H. Liu, W. J.

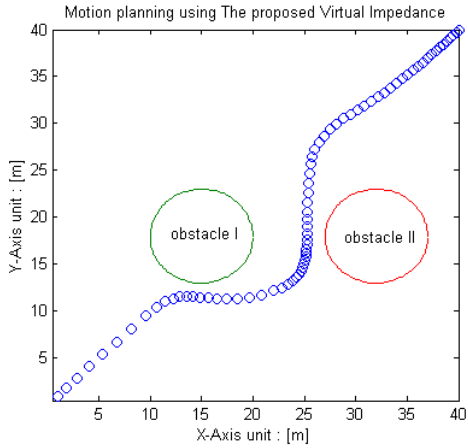


그림 8. 제안된 가상 임피던스 방법
Fig. 8. The proposed virtual impedance method

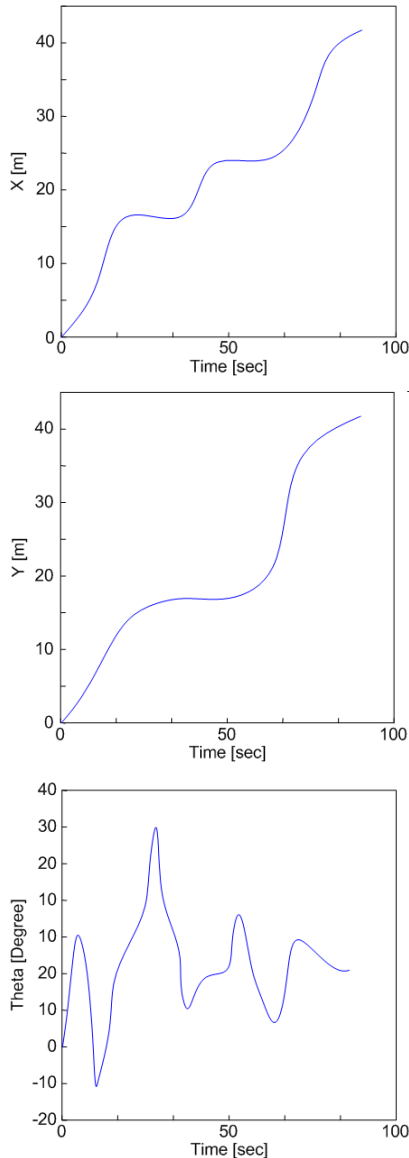


그림 9. 그림 8에 대한 x, y, theta 값
Fig. 9. x, y, theta for the results of Fig. 8

- Li, T. Kaga, and T. Fukuda, "Haptic Information in Internet-Based Teleoperation," *IEEE/ASME Trans. on Mechatronics*, vol. 6, no. 3, 2001.
- [9] S. Lee, G. S. Sukhatme, G. J. Kim, and C. Park, "Haptic Control of a Mobile Robot: A User Study," *Proc. of IEEE/RSJ Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 2867-2874, 2002.
- [10] Baoguo Li, and Chunxi Zhang, "Adaptive fuzzy control for mobile robot obstacle avoidance based on virtual line path tracking" *Proc. Of the 2006 IEEE, International conference on Robotics and Biomimetics*, pp.1454-1458, 2006.
- [11] J. Borenstein and Y. Koren, "Histogramic in-motion mapping for mobile robot obstacle avoidance," *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, vol. 7, pp. 535-539, 1991.
- [12] T. Arai, H. Ogata, and T. Suzuki, "Collision Avoidance among Multiple Robots Using Virtual Impedance," *Proc. of IEEE/RSJ Int. Workshop on Intelligent Robots and Systems*, pp. 479-485, 1989.
- [13] Kitagawa, L.; Kobayashi, T.; Beppu, T.; Terashima, K., "Semi-autonomous obstacle avoidance of omnidirectional wheelchair by joystick impedance control" *Intelligent Robots and Systems, 2001. Proc. of IEEE/RSJ International Conference on*, vol.4, pp. 2148 - 2153, Nov. 2001

저 자 소 개

진태석(Jin TaeSeok)

퍼지 및 지능시스템학회 논문지 17권 3호 참조