

이동로봇의 원격제어를 위한 힘 반향 조이스틱의 개발

Development of Force Feedback Joystick for Remote Control of a Mobile Robot

서세욱* · 유봉수* · 조중선**

Se-Wook Suh*, Bong-Soo Yoo* and Joongseon Joh**

* 창원대학교 제어계측공학과 대학원

** 창원대학교 공과대학 제어계측공학과

jsjoh@changwon.ac.kr

요 약

기존의 이동로봇 시스템은 완전한 자율주행이 주된 목표였으며 이때 영상정보는 단지 모니터링을 하는 보조적인 수단으로 사용되었다. 이에 따라 이동로봇의 자체 기능이 점차 고도화되는 방향으로 연구가 진행되었고, 제작비 또한 함께 상승하게 되었다. 그러나 구동만이 목적인 저렴한 이동로봇 시스템을 조작자가 원격 제어하는 것 또한 중요한 분야 중 하나이다. 이때 원격제어에 사용되는 신호로는 카메라에 의한 영상정보와 초음파 센서 등에 의한 거리정보를 주로 사용하게 된다. 그러나 영상정보는 3차원의 입체적 정보를 제공하는 데에는 부적절하기 때문에 초음파 센서를 이용한 거리정보가 매우 유용하게 된다.

본 논문에서는 초음파 센서의 정보를 이용한 원격제어용 힘 반향 조이스틱을 개발하였다. 힘 반향 알고리즘은 하나의 식으로 표현하기 곤란하므로 전문가 시스템의 구현이 매우 필요한 분야이다. 따라서 퍼지 논리를 사용하여 생성한 힘 반향 알고리즘을 이동로봇 원격제어에 사용함으로써 조작자가 이동로봇 주변 환경을 쉽게 인식하여 이동로봇을 안전하게 주행할 수 있도록 하였다.

Abstract

The main goal of existing mobile robot system was a complete autonomous navigation and the vision information was just used as an assistant way such as monitoring. For this reason, the researches have been going towards sophistication of autonomousness gradually and the production costs also has been risen.

However, it is also important to control remotely an inexpensive mobile robot system which has no intelligence at all. Such systems may be much more effective than fully autonomous systems in practice. Visual information from a simple camera and distance information from ultrasonic sensors are used for this system. Collision avoidance becomes the most important problem for this system.

In this paper, we developed a force feedback joystick to control the robot system remotely with collision avoiding capability. Fuzzy logic is used for the algorithm in order to implement the expert's knowledge intelligently. Some experimental results show the force feedback joystick works very well.

Key Words : 힘 반향 조이스틱, 원격제어, 퍼지제어, 이동로봇, 가상 힘 영역기법

1. 서 론

이동로봇의 원격제어는 데이터 전송 속도 및 시간지연과 같은 통신상의 제약뿐만 아니라 조작자에게 제공되는 작업 환경정보에도 크게 영향을 받는다. 전자의 경우 통신기술과 장비들의 발달로 인해 크게 개선되었으나, 후자의 경우에는 작업환경을 측정하는 장비에 크게 의존적이다. 최근에는 카

메라와 같은 장비를 이용한 시각정보로 우수한 환경정보를 제공받을 수 있게 되었지만, 이동 로봇의 경우에는 2차원적 시각정보 만으로는 불충분하다. 이에 따라 입체적인 주변환경을 획득하기 위하여 다수의 초음파 센서를 이용한 다양한 연구가 진행되었다[1]. 또한 초음파 센서로부터 획득된 거리정보를 이용한 가상 힘 영역(Virtual Force Field) 기법은 장애물과 이동로봇 사이에 가상영역을 두고 그 영역을 침범할 때 반향 힘을 발생시킴으로써 효과적으로 장애물을 회피하였다[2, 3]. 그리고 이 기법을 원격제어에 응용하여 조이스틱을 통해 조작자에게 반향 힘을 전달함으로써 촉각적인 정보까지 제공할 수 있게 되었다. 이러한 이점으로 인하여 원격제어용 매니플레이터나 전동 휠체어, 그리고 원격 의료용 로봇과 같은 분야에 조이스틱을 이용하여 촉각정보를 제공함으로써 안

접수일자 : 2002년 12월 7일

완료일자 : 2002년 12월 28일

본 연구는 과학기술부 · 한국과학재단 지정 창원대학교 공작기계기술연구소 지원에 의한 것입니다.

정성 및 신뢰성 향상을 위한 많은 연구가 진행되었다[4, 5, 6]. 이때 반향 힘을 원격의 조작자에게 전달하는 매개체로 힘 반향 조이스틱이 주로 사용된다.

기존의 이동로봇 시스템은 완전한 자율주행이 주된 목표였으며, 이에 따라 자체 기능이 점차 고도화되는 방향으로 연구가 진행되었고, 제작비 또한 함께 상승하게 되었다. 그러나 구동만이 목적인 저렴한 이동로봇 시스템을 조작자가 원격 제어하는 것 또한 중요한 분야 중 하나이다. 이와 같은 맥락으로 본 논문에서는 이동로봇의 원격제어를 위한 힘 반향 조이스틱을 개발하였다. 그리고 반향 힘 생성 알고리즘은 주변상황의 불확실성이나 매개 변수자체가 고정되어지는 것이 아니기 때문에 한 수식으로 표현하기 곤란하다. 따라서 반향 힘 생성 알고리즘을 퍼지 논리와 VFF 기법을 이용하여 구현하였으며, 이를 직접 개발한 힘 반향 조이스틱에 적용함으로써 그 효용성을 실험을 통하여 검증하였다.

2. 힘 반향 조이스틱을 이용한 이동로봇의 원격제어

기존의 원격제어에서는 이동로봇의 제어입력 신호로 카메라에 의한 영상정보만을 주로 사용하였다. 그러나 영상정보는 3차원의 입체적 정보를 표현하기에는 부적절하기 때문에 영상정보에만 의존하여 이동로봇을 제어할 경우 여러 가지 예기치 않은 상황이 발생할 수 있다. 따라서 초음파 센서의 거리정보를 이용하여 조작자의 조이스틱에 반향 힘을 생성시켜 줌으로써 조작자가 장애물에 대한 접근도를 알 수 있도록 할 수 있다. 즉 힘 반향 조이스틱을 이용함으로써 이동로봇을 보다 안전하게 제어할 수 있다.

그림 1은 힘 반향 조이스틱을 이용한 원격제어 이동로봇의 전체 구조이다.

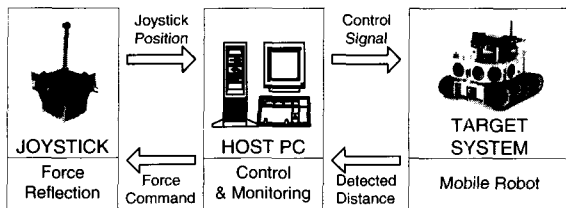


그림 1. 원격제어 이동로봇 시스템의 전체구조
Fig. 1. Overall System Architecture of mobile robot with remote control

이동로봇은 HOST PC에서 전송되는 제어 명령을 입력받고 초음파 센서에 의해 측정된 거리 정보를 송신한다. 이때 이동로봇으로부터 전송된 장애물과의 거리 정보를 입력받은 HOST PC는 모니터링 프로그램에 의해 반향 힘을 생성시키고, 생성된 반향 힘을 조이스틱으로 전송한다. 그리고 힘 반향 조이스틱은 반향 힘에 의해 로봇 제어신호를 생성시키고 이것을 이동로봇으로 전송하여 이동로봇을 원격으로 제어한다.

3. 원격제어용 힘 반향 조이스틱

3.1 전체 알고리즘 구성도

힘 반향 조이스틱의 반향 힘 생성을 위한 전체 알고리즘

구성도는 그림 2와 같다.

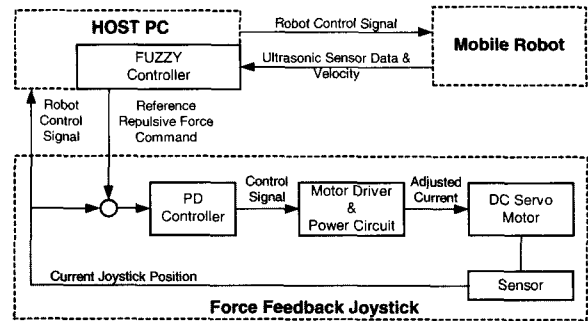


그림 2. 전체 알고리즘 구성도
Fig. 2. Overall algorithm structure

첫 번째 단계로 HOST PC는 이동로봇에 장착된 초음파 센서에 의해 측정된 거리정보와 속도정보를 전송 받아 이 정보들을 입력으로 하는 퍼지 알고리즘을 수행하여 반향 힘을 생성시킨다. 그리고 생성된 반향 힘은 힘 반향 조이스틱으로 전송된다.

다음으로 반향 힘 정보를 입력받은 힘 반향 조이스틱은 현재 위치를 검출하여 두 입력의 편차를 계산한다. 그리고 이 편차를 이용한 PD 제어기의 제어 출력으로 직류 서보 모터를 제어함으로써 조이스틱을 구동한다. 이때의 힘 반향 조이스틱의 위치 정보는 PD 제어기로 변환되며, 또한 HOST PC로 전송되어 HOST PC의 모니터링 프로그램에 의해 이동로봇의 제어신호를 생성한다.

마지막으로 이동로봇은 HOST PC에서 생성된 제어신호로 원격 구동되며, 탑재된 초음파 센서에 의해 측정된 거리 정보를 HOST PC로 전송한다.

3.2 반향 힘 생성 알고리즘

HOST PC는 장애물과의 거리정보와 이동로봇의 속도정보를 이용한 퍼지 제어기로 반향 힘의 크기를 결정하고, VFF 기법에 의해 결정된 반향 힘의 방향성분과 결합하여 기준 반향 힘을 생성하고 조이스틱으로 전송한다.

그림 3은 힘 반향 조이스틱을 위한 반향 힘 생성 알고리즘 구성도이다.

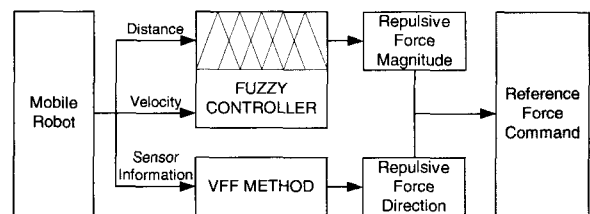


그림 3. 반향 힘 생성 알고리즘 구성도
Fig. 3. Repulsive force generating algorithm structure

기존의 VFF 기법의 개념은 장애물에 가상의 영역을 두고 이동로봇이 이 가상영역을 침범하였을 경우 이동로봇의 진행 방향 벡터와 침범한 영역에서 발생하는 반향 벡터의 합성으로 장애물을 충돌없이 회피하는 방법으로 단순히 장애물과의 거리와 방향을 이용하여 반향 힘 벡터를 생성한다.

본 논문에서는 기존의 VFF 기법에 이동로봇의 속도성분

을 더하여 반향 힘 벡터를 생성시켰다. 즉 장애물과의 거리 정보와 이동로봇의 속도정보를 이용한 퍼지 알고리즘으로 반향 힘의 크기를 결정하고, VFF 기법에 의해 반향 힘의 방향을 결정하여 실제 힘 반향 조이스틱에 적용될 반향 힘 벡터를 구하였다. 이동로봇의 속도를 추가로 고려하여 반향 힘을 생성시키고, 이를 조작자에게 전달하기 위하여 힘 반향 조이스틱을 이용함으로써 개선된 성능을 제공한다.

3.2.1 퍼지 제어기에 의한 반향 힘의 크기 결정

이동로봇에 장착된 초음파 센서에 의해 장애물이 감지될 경우, 감지된 센서 중 최단 거리를 측정된 센서의 거리 d 와 거리가 측정될 당시의 이동로봇의 속도 v 가 반향 힘 크기 생성 알고리즘의 입력변수로 사용된다. 그리고 출력변수는 반향 힘의 크기인 F_r 이다. 따라서 아래와 같은 퍼지 생성 규칙을 갖는다.

Rule i : IF d is A_i and v is B_i

Then F_r is C_i ; $i = 1, \dots, n$

위 식에 의해 퍼지 규칙은 표 1과 같이 표현된다.

표 1. 반향 힘 크기 생성을 위한 퍼지규칙

Table. 1. Fuzzy Rules for generating amplitude of repulsive force

$d \backslash v$	VZ	VVS	VS	VF	VVF
DZ	FS	FS	FVS	FVS	FVS
DVZ	FW	FS	FS	FS	FVS
DN	FVW	FW	FW	FS	FS
DF	FZ	FVW	FVW	FW	FW
DVF	FZ	FZ	FZ	FVW	FW

언어변수인 ' d ', ' v ', 그리고 ' F_r '의 언어항은 각각 {DZ, DVN, DN, DF, DVF}, {VZ, VVS, VS, VF, VVF}, {FZ, FVW, FW, FS, FVS}이다. 입력변수와 출력변수의 소속함수는 그림 4, 5, 그리고 6 과 같다.

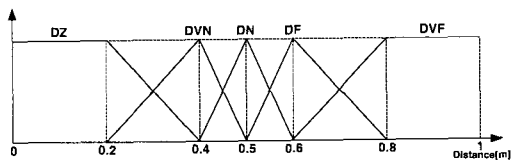


그림 4. 언어변수 ' d '의 소속함수

Fig. 4. Membership function of linguistic variable ' d '

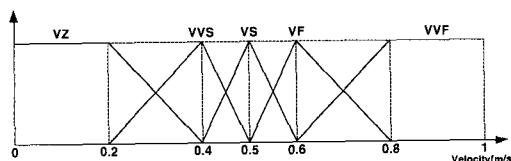


그림 5. 언어변수 ' v '의 소속함수

Fig. 5. Membership function of linguistic variable ' v '

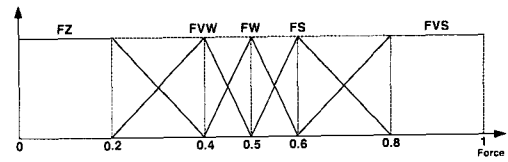


그림 6. 언어변수 ' F_r '의 소속함수

Fig. 6. Membership function of linguistic variable ' F_r '

모든 언어변수들은 정규화된 값이며, 입력변수인 d 와 v 는 각각 3과 1이 사용되었다. 그리고 출력변수인 F_r 의 500이 사용되었다.

3.2.2 VFF에 의한 반향 힘의 방향 결정

기존의 VFF 기법의 기본 개념은 그림 7에 나타난 것과 같다. 이동로봇에서 감지된 센서가 S1~S5일 때, 각 센서에서 반향되는 벡터의 합에 의해 반향 벡터 F_r 이 결정되고, 이동로봇에서 목적지로 향하는 크기가 고정된 목적지 벡터 F_t 와의 합성에 의해 이동로봇의 진행 벡터 R이 결정된다. 이동로봇은 진행 벡터 R의 방향으로 주행함에 따라 장애물을 회피한다[7].

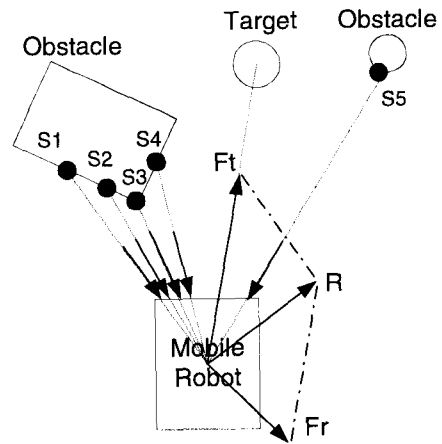


그림 7. VFF의 기본 개념

Fig. 7. Basic concept of VFF method

본 논문에서는 장애물이 감지될 때 로봇의 진행방향을 기준으로 반향 힘의 방향을 감지된 장애물과의 거리 중 최소의 거리를 감지한 두 개의 센서에서 생성되는 반향 벡터의 조합에 의해 기준 힘 반향 벡터의 방향을 결정하였다.

그림 8 과 같이 장애물을 감지한 센서 중 최소 거리를 감지한 2개의 센서가 S_{min1} 과 S_{min2} 일 때 이동로봇의 좌표 ($X_j - Y_j$)에서 두 센서와 정반대 되는 두 각을 알 수 있다. 두 반향 각에 의해 이동로봇 좌표에서 반향 기준 벡터는 식 (1)과 같다.

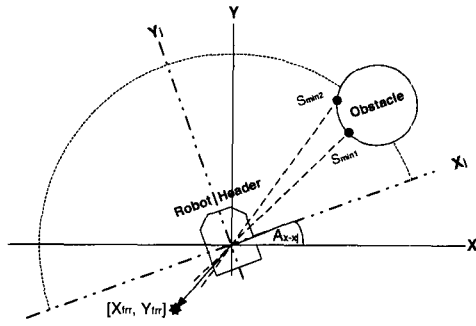


그림 8. 반향 힘의 방향 생성 알고리즘

Fig. 8. Direction generation algorithm of repulsive force

$$\begin{bmatrix} X_{frr} \\ Y_{frr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\left(\left(\frac{\phi_1 + \phi_2}{2}\right) + \pi\right) \\ \sin\left(\left(\frac{\phi_1 + \phi_2}{2}\right) + \pi\right) \end{bmatrix} \quad (1)$$

이때 이동로봇은 힘 반향 조이스틱에 의해 원격제어 된다. 따라서, 조이스틱에 설정된 절대좌표 (X-Y)와 이동로봇 좌표와의 회전각 ($A_{x,-x_i}$)을 알 수 있다. 결국 반향 힘 벡터의 방향 (X_{frr}, Y_{frr})은 다음과 같이 결정된다.

$$\begin{bmatrix} X_{frr} \\ Y_{frr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(A_{x,-x_i}) & -\sin(A_{x,-x_i}) \\ \sin(A_{x,-x_i}) & \cos(A_{x,-x_i}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_{frr} \\ Y_{frr} \end{bmatrix} \quad (2)$$

결과적으로는 식 (2)에 의해 구해진 반향 힘 벡터에서 X 축 성분과 Y축 성분 중 큰 성분이 영향을 미치도록 하였다.

3.3 조이스틱의 반향 힘 발생을 위한 PD 제어기

제작된 힘 반향 조이스틱은 두 개의 직류 서보 모터에 의해 반향 힘을 발생시킨다. 내부 제어 흐름은 그림 9 와 같다.

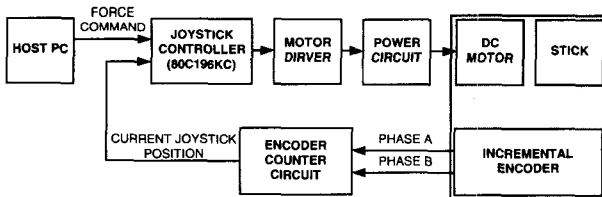


그림 9. 힘 반향 조이스틱의 제어 흐름

Fig. 9. Control flow of force feedback joystick

힘 반향 조이스틱이 고정된 기준위치에서 벗어날 경우, 조이스틱과 기준위치와의 거리편차를 에러 (e)로 정의하고, 에러의 샘플링 시간당 변화분을 \dot{e} 라 하면, 이때의 반향 힘 (F)은 아래의 식과 같이 표현된다.

$$F = K_p e + K_d \dot{e} \quad (3)$$

여기서, K_p 는 비례 이득, K_d 는 미분 이득이다. 즉 힘 반향 조이스틱은 HOST PC에서 공급되는 기준 반향 힘 벡터를 추종하도록 힘을 발생시키며, 내부의 PD제어기에 의해 직류 서보 모터를 제어함으로써 조작자에게 힘을 전달한다. 최종적으로 실험에 사용된 이득 값은 비례이득과 미분이득이 각각 0.6과 0.005가 사용되었다.

4. 실험 결과

실험에 사용된 조이스틱과 제어기는 그림 10 과 같다. 조이스틱은 자체 제작되었으며, 위치 검출 및 제어를 위하여 2개 채널의 100 [pulse/rev]인 증가형 엔코더를 내장한 2개의 서보 직류 모터가 사용되었다. 그리고 제어기는 인텔사의 80C196KC로 설계되었다.

실험에 사용된 이동로봇의 최대 속도는 0.8 [m/s]로 설정하였으며, 초음파 센서는 이동로봇의 진행 방향에 30. 간격으로 배치하였다. 그리고 초음파 센서의 최대 측정 가능거리는 13-300 [cm]로 설정하였다.

샘플링 시간은 전체 시스템 루프와 힘 반향 조이스틱의 PD제어 루프가 각각 50 [ms], 10 [ms]이다.

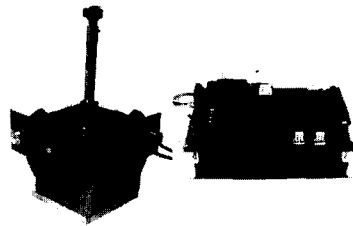


그림 10. 힘 반향 조이스틱

Fig. 10. Force feedback joystick

4.1 장애물이 감지되지 않았을 경우

그림 11, 12는 장애물이 감지되지 않았을 경우, 조이스틱을 놓쳤을 때 나타나는 반향 힘의 크기를 나타내었다. 장애물이 감지되지 않을 때에 조이스틱의 기준점은 항상 조이스틱 좌표에서의 원점을 가리키게 되는데, 이는 원점의 조작자가 이동로봇 구동 중 조이스틱을 놓쳤을 때 이동로봇을 멈추기 위함이다. 실험 결과 원점을 벗어났을 때 이에 상응하는 반향 힘이 나타남을 알 수 있으며, 그림 11,12에서 조이스틱을 놓친 이후인 1.7[s]에서 0.8[s] 이내에 기준점인 0을 추종함을 알 수 있다.

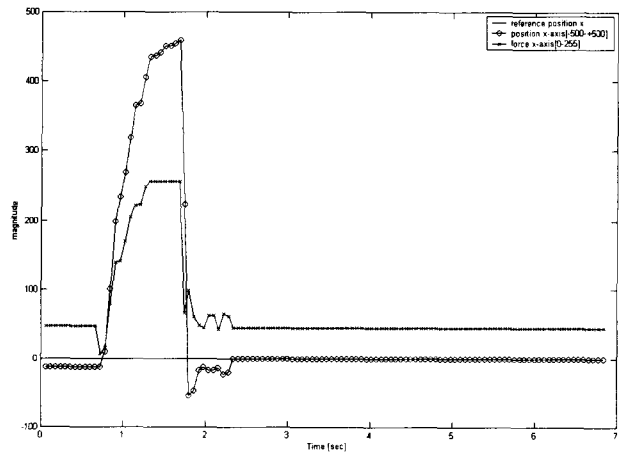


그림 11. 기준점이 0일 때, X축의 반향 힘

Fig. 11. Repulsive forces of x-axis by spring and damper

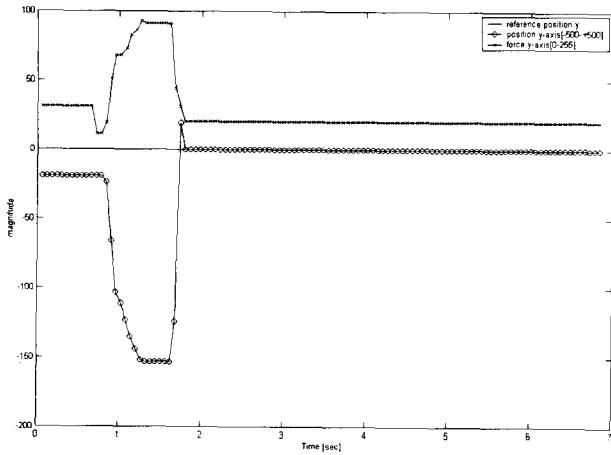


그림 12. 기준점이 0일 때, Y축의 반향 힘

Fig. 12. Repulsive forces of y-axis by spring and damper

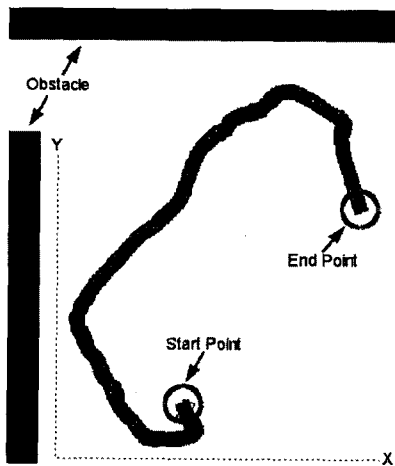


그림 13. 이동로봇의 궤적

Fig. 13. Trajectory of mobile robot

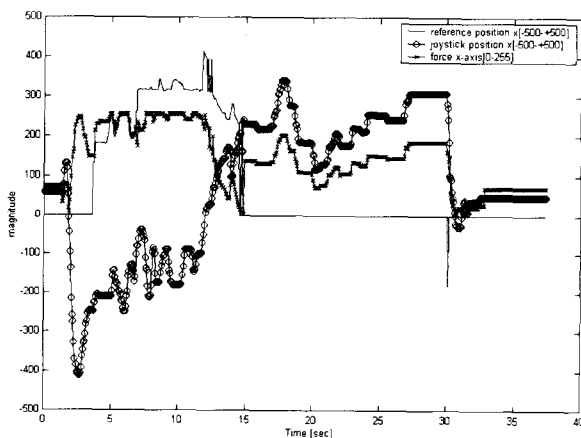


그림 14. 조이스틱의 X축의 반향 힘

Fig. 14. Repulsive forces of x-axis of joystick

4.1 장애물이 감지되었을 경우

그림 13는 실험에 사용된 장애물과 이동로봇의 궤적을 나타낸다. 이동로봇이 장애물을 감지하였을 경우의 실험 결과를 그림 14, 15에 나타내었다. HOST PC의 퍼지 알고리즘과 VFF에 의해 발생된 기준 반향 힘 벡터를 추종하기 위하여 힘 반향 조이스틱에서 그에 상응하는 반향 힘이 발생함을 알 수 있다. 그림 16는 조이스틱의 두 축에서 발생하는 힘과 초음파 센서에 의해 감지된 거리를 나타낸다.

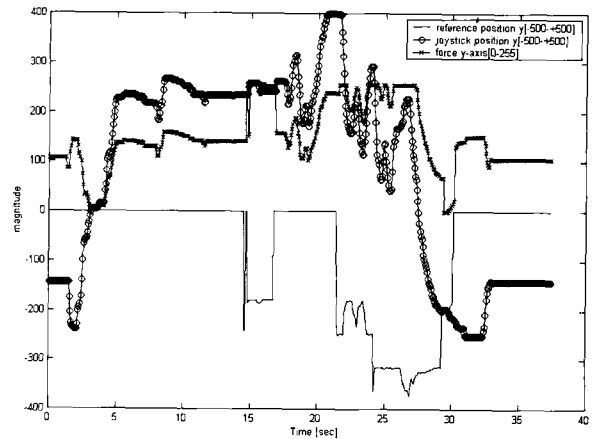


그림 15. 조이스틱의 Y축의 반향 힘

Fig. 15. Repulsive forces of x-axis of joystick

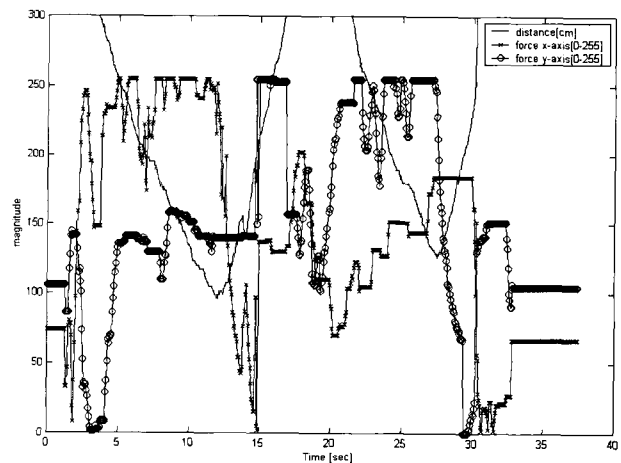


그림 16. 반향 힘과 측정된 장애물과의 거리

Fig. 16. Repulsive forces and measured distance between obstacles

5. 결론 및 향후 연구방향

본 논문에서는 이동로봇의 원격제어를 위한 힘 반향 조이스틱을 개발하였다. 초음파 센서의 거리정보와 이동로봇의 속도를 입력변수로 하고, 출력 변수가 반향 힘의 크기인 퍼지 제어기 구현하였으며, 반향 힘의 방향성분을 VFF를 적용하여 생성시켰다. 그리고 이를 직접 개발한 힘 반향 조이스틱에 적용함으로써 그 효용성을 실험을 통하여 검증하였다. 본 연구에서 개발된 힘 반향 조이스틱을 이동로봇의 원격제

어에 이용함으로써 조작자는 장애물 출현 시 특정 위치에 물체가 존재함을 느낌으로써 주행을 원활히 수행할 수 있었다.

그러나 실제 제작된 힘 반향 조이스틱은 퍼지 제어를 반향 힘의 크기에만 적용함으로써 급격한 변화에 대한 반향 힘을 조작자가 받을 때 부담을 느낄 수 있다. 앞으로 방향 성분에 대해서도 퍼지 알고리즘 적용하는 연구가 진행되어야 할 것이다.

참 고 문 헌

- [1] S. Thongchai, S. Suksakulchai, D. M. Wilkes, and N. Sarkar, "Sonar Behavior-Based Fuzzy Control for a Mobile Robot," *2000 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics - Vol.5*, pp. 3532-3537, 2000.
- [2] Kwang-Young Im, Se Young Oh, "An Extended Virtual Force Field Based Behavioral Fusion with Neural Networks and Evolutionary Programming for Mobile Robot Navigation," *Proc. of the 2000 Congress on Evolutionary Computation - Volume 2*, pp. 1238-1244, 2000.
- [3] Sun-Gi Hong, Ju-Jang Lee, Seungho Kim, "Generating Artificial Force for Feedback Control of Teleoperated Mobile Robots," *Proc. of the 1999 International Conference on Intelligent Robots*, pp. 1721-1726, 1999.
- [4] Noriaki ANDO, Masahito OHTA, Kouhei GONDA, Hideki HASHIMOTO, "Micro Teleoperation with Parallel Manipulator," *Proc. of the 2001 IEEE/ASME International Conference on Advanced*, pp. 63-68, 2001.
- [5] Ren C. Luo, Chi-Yang Hu, Tse Min Chen, Meng-Hsien Lin, "Force Reflective Feedback Control for Intelligent Wheelchairs," *Proc. of the 1999 International Conference on Intelligent Robots*, pp. 918-923, 1999.
- [6] Fumihito ARAI, Mistutaka TANIMOTO, Toshio FUKUDA, "Concept of Multimedia Tele-medicine and Fundamental Experiment for Catheter," *Transactions of the Institute of Electrical Engineers of Japan C - A*, V.117-C N5, , 1997.
- [7] Borenstein, J. and Koren, Y., 1989, "Real-time Obstacle Avoidance for Fast Mobile Robots," *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, Vol. 19, No. 5, Sept./Oct., pp. 1179-1187.

저 자 소개



서세욱(Se-Wook Suh)

2001년 : 창원대 제어계측공학과 졸업
2001년~현재 : 동 대학원 제어계측공학과 석사과정

관심분야 : 퍼지 제어, 마이크로 프로세서를 이용한 제어기 설계



유봉수(Bong-Soo Yoo)

2000년 : 창원대 제어계측공학과 졸업
2002년 : 동 대학원 제어계측공학과 졸업 (공학석사)

2002년~현재 : 동 대학원 제어계측공학과 박사과정

관심분야 : 퍼지 제어, 마이크로 프로세서를 이용한 제어기 설계, 이동로봇



조중선(Joongseon Joh)

1991년 : Georgia Institute of Technology, Department of Mechanical Eng. (공학박사)

1991년~1993년 : 국방과학연구소

1993년~현재 : 창원대학교 제어계측공학과 부교수

2001년 : IEEE Trans. of Fuzzy Systems 최우수 논문상 수상

관심분야 : 지능 제어, DSP 기반 Controller 개발, BLDC Motor Driver & Controller 개발, 전용 Robot System 개발