

카메라와 초음파센서 융합에 의한 이동로봇의 주행 알고리즘

Mobile Robot Navigation using Data Fusion Based on Camera and Ultrasonic Sensors Algorithm

장기동*, 박상건*, 한성민*, 이강웅*

Gi-Dong Jang*, Sang-Keon Park*, Sung-Min Han* and Kang-Woong Lee*

요 약

본 논문에서는 단일 카메라와 초음파센서 데이터를 융합하는 이동 로봇 주행제어 알고리즘을 제안하였다. 이진화 영상처리를 위한 임계값을 영상 정보와 초음파센서 정보를 이용하는 퍼지추론기법으로 설정하였다. 임계값을 상황에 따라 가변하면 조도가 낮은 환경에서도 장애물 인식이 향상된다. 카메라 영상 정보와 초음파 센서 정보를 융합하여 장애물에 대한 격자지도를 생성하고 원계적 경로기법으로 장애물을 회피하도록 한다. 제안된 알고리즘의 성능을 입증하기 위하여 조도가 낮은 실내와 좁은 복도에서 Pioneer 2-DX 이동로봇의 주행제어에 적용하였다.

Abstract

In this paper, we propose a mobile robot navigation algorithm using data fusion of a monocular camera and ultrasonic sensors. Threshold values for binary image processing are generated by a fuzzy inference method using image data and data of ultrasonic sensors. Threshold value variations improve obstacle detection for mobile robot to move to the goal under poor illumination environments. Obstacles detected by data fusion of camera and ultrasonic sensors are expressed on the grid map and avoided using the circular planning algorithm. The performance of the proposed method is evaluated by experiments on the Pioneer 2-DX mobile robot in the indoor room with poor lights and a narrow corridor.

Key words : Mobile Robot, Navigation, Data fusion

I. 서 론

장애물을 회피하여 목적지까지 이동하는 이동로봇의 자율주행에 대한 많은 연구가 진행되고 있다. 주행해야 될 환경을 정확하고 신속하게 파악하고 안전하게 목적지로 이동하기 위해서는 장애물을 회피

하면서 목적지로 향해야 하는 항법, 경로계획과 이동로봇 제어기법이 조합되어야 한다[1].

이동로봇의 항법 중 APF(Artificial Potential Field) 기법[2][3]은 장애물에 가상척력을 적용하고 목적지에 가상인력을 적용해서 APF 지도를 만들고 이를 이용하여 이동경로를 생성한다. 이 기법은 목적지로 이동하는 최단경로를 생성하며 장애물이 많은 복잡한

* 한국항공대학교

· 제1저자 (First Author) : 장기동

· 투고일자 : 2011년 9월 30일

· 심사(수정)일자 : 2011년 9월 31일 (수정일자 : 2011년 10월 26일)

· 게재일자 : 2011년 10월 30일

환경에서 유용하나 U자형 지형에서는 경로를 생성하기가 어렵다. limit-cycle 기법[4][5]은 장애물을 중심으로 limit cycle을 형성하여 장애물을 회피하는 방법으로 유연한 경로를 생성하지만 여러 개의 장애물이 인접한 환경에서는 limit cycle이 중첩될 수 있기 때문에 회피경로 생성이 어려울 수 있다. 복잡한 환경에서 유용한 ND(Nearness Diagram) 기법[6]은 단순한 환경에서는 적합하지 못하다.

장애물을 회피하여 경로를 생성하기 위해서는 경로 상에 있는 장애물을 탐지하여야 한다. 초음파센서를 사용하는 경우 이동로봇의 주행방향 측면에 위치하는 장애물에 대한 인식률이 저하되며 정면에 있는 장애물도 거리가 멀면 인식 오류가 발생할 수 있다. 카메라를 사용하면 전방 넓은 범위에 있는 장애물을 효과적으로 인식할 수 있으나 빛에 의한 인식 오류, 휘도 때문에 바닥면과 구분이 되지 않는 장애물, 투명한 장애물 등에 대한 인식이 어렵다. 또한 영상처리시간에 따른 이동시간의 지연 등의 문제도 상존한다. 카메라에 의해 획득된 영상을 이진화 할 때 환경에 따라 이진화 임계값을 조절하면 광학적 불확실성에 의한 영향을 감소시킬 수 있다.

본 연구에서는 초음파센서와 카메라 영상 데이터를 융합하여 장애물을 표시하는 격자지도를 생성하고 원래적 경로기법[7]을 이용하여 목적지에 도달하도록 하는 주행제어기법을 제안한다. 퍼지추론 기법을 적용하여 카메라 영상의 이진화 임계값을 가변시킴으로써 휘도변화에 따른 인식 오류를 줄이도록 한다. 이동로봇 전면을 격자지도로 나타내고 카메라에 의한 장애물 정보와 초음파센서에 의한 장애물 정보를 중첩시켜 개설편 센서의 결함이 보완되도록 한다. 제안된 기법을 Pioneer 2-DX 이동로봇에 적용하여 휘도가 낮은 어두운 환경과 복도와 같이 벽이 있는 공간에서도 장애물을 회피하면서 목적지로 이동하는데 효과적임을 입증하였다.

II. 영상처리시스템

이동로봇의 전방에 있는 장애물을 감지하기 위한 카메라 장착은 그림 1과 같이 이동로봇 상부에서 지면을 향하도록 장착하고 노트북에 연결시킨다. 초음파센서는 이동로봇이 전면에 8개가 등간격으로 배치되어 있다.

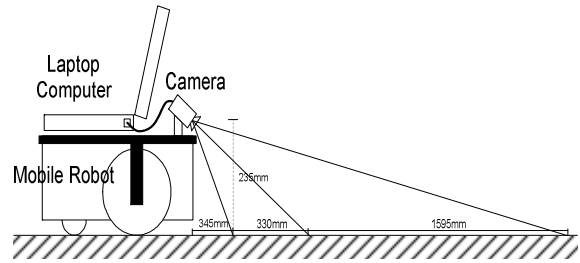


그림 1. 카메라 장착구조

Fig. 1. Geometric structure of the camera system

카메라에 의해 획득되는 칼라 이미지는 흑백 이미지로 변환되는데 이미지의 크기를 줄이기 위하여 $n \times n$ 픽셀(pixel) 그룹을 다음 식을 이용하여 한 개의 픽셀로 압축시킨다[7].

$$I(x,y) = \frac{1}{n^2} \sum_{k=0}^{n-1} \sum_{l=0}^{n-1} i(nx+k, ny+l) \quad (1)$$

여기서 $i(x,y)$ 는 변환될 이미지 프레임의 픽셀 좌표이고 $I(x,y)$ 는 압축된 이미지 프레임의 픽셀좌표이다.

압축된 이미지 크기는 $\frac{1}{n^2}$ 로 줄기 때문에 n 을 증가시키면 장애물 감지를 위한 영상처리 속도를 향상시킬 수 있으며 영상잡음이나 빛의 변화에 따른 영향을 줄일 수 있다. 지면의 색을 구분할 수 있으면 압축된 이미지는 이진 이미지로 변환되어 지면과 장애물을 분리한다.

이미지 프레임 좌표는 그림 2와 같이 로봇 프레임으로 변환될 수 있다[9]. 장애물이 지면에 부착되어 있다고 가정하면 그림 2의 파라미터 α , β 와 θ 는 다음과 같이 정의할 수 있다.

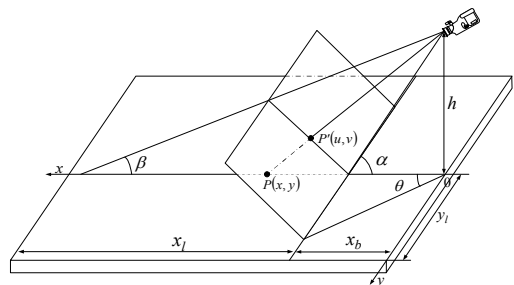


그림 2. 이미지 프레임과 로봇 프레임

Fig. 2. The image frame and the robot frame

$$\alpha = \tan^{-1} \frac{h}{x_b} \quad (2)$$

$$\beta = \tan^{-1} \frac{h}{x_b + x_l} \quad (3)$$

$$\theta = \tan^{-1} \frac{y_l}{x_b} \quad (4)$$

여기서 h 는 지면에서 카메라까지의 높이, x_b 는 카메라 사각지역의 길이, x_l 과 y_l 은 카메라가 관측할 수 있는 x 방향과 y 방향의 최대 폭이다.

이미지 프레임의 이미지 좌표값 $P(u,v)$ 를 로봇 프레임의 좌표값 $P(x,y)$ 는 다음과 같이 얻는다.

$$x = h \tan \left[(90 - \alpha) + \frac{u}{S_x} (\alpha - \beta) \right] \quad (5)$$

$$y = x \tan \left[\frac{2v}{S_y} \theta \right] \quad (6)$$

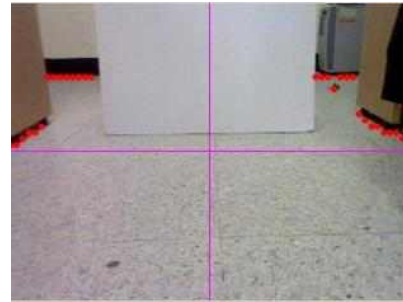
여기서 S_x 와 S_y 는 이미지 프레임의 수직방향과 수평방향의 총 픽셀 수이고 u 와 v 는 이미지 프레임의 특징점 좌표값이다.

III. 센서융합

단일 종류의 센서만을 사용하는 경우 장애물 감지 오류가 발생할 수 있다. 카메라만을 사용하는 경우 그림 3(a)와 같이 주행경로 지면과 같은 명도의 가운데 흰 장애물은 이진 영상처리하면 그림 3(b)와 같이 나타나지 않으므로 감지가 되지 않는다. 이진화하는 과정에서 휘도변화에 따라 이진화 임계값을 가변시키면 바닥면색과 유사한 장애물, 그림자 등을 식별가능하게 된다. 임계값을 낮추면 그림자는 식별되지 않으며 임계값을 높이면 바닥면과 유사한 장애물도 식

별될 수 있다.

초음파만을 사용하는 경우에는 그림 4와 같이 먼 거리에 있는 장애물은 감지 정확도가 떨어지고 잡음의 영향도 많다. 이와 같이 한 종류의 센서만을 사용할 때의 단점을 보완하기 위하여 센서융합이 요구된다[10]-[12].



(a) 카메라가 획득한 영상
(a) Image obtained by camera

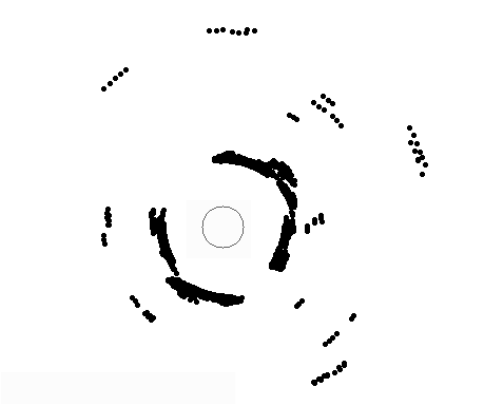


(b) 2진 처리 후의 영상
(b) Image after binary processing

그림 3. 카메라만을 사용한 장애물 감지
Fig. 3. Obstacle detection using only a camera



(a) 장애물
(a) Obstacles



(b) 감지 결과
(b) detection result

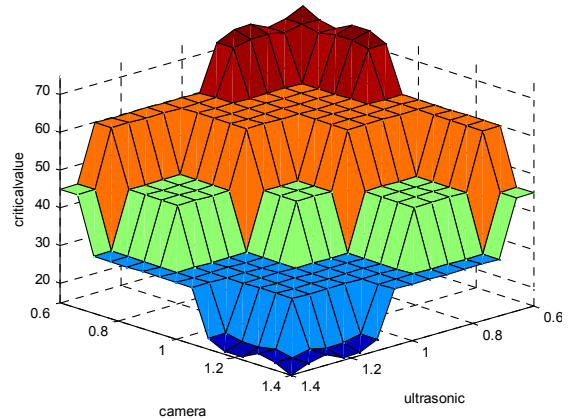
그림 4. 초음파만을 사용한 장애물 감지
Fig. 4. Obstacle detection using only ultrasonic sensors

본 논문에서는 퍼지추론 기법[13]을 이용하여 이진화 영상의 임계값을 가변적으로 정함으로써 장애물 식별 정확도를 높이고자 한다. 초음파센서가 감지하는 장애물까지의 거리에 따라 소속함수를 정하는데 계산을 단순화하기 위하여 영상데이터에 대한 소속함수도 초음파센서의 경우와 동일하게 설정하였다. 퍼지추론에 필요한 퍼지규칙은 그림 5 (a)와 같이 초음파 센서 데이터와 영상데이터를 각각 5개의 소속함수로 구분하고 추론한다. 추론결과는 최대평균법을 적용한 비퍼지화 단계를 거쳐 이진화 영상처리를 위한 임계값을 정한다. 임계값은 장애물이 가까이 있으면 임계값을 크게 하고, 장애물이 멀리 있으면 임계값이 작게 되도록 한다. 퍼지추론에 의한 임계값의 선정은 그림 5 (b)와 같다.

		Ultrasonic sensor				
		ZE	PS	PM	PB	PV
Camera	ZE	ZE	ZE	PS	PS	PM
	PS	ZE	PS	PS	PM	PB
	PM	PS	PS	PM	PB	PB
	PB	PS	PM	PB	PB	PV
	PV	PM	PB	PB	PV	PV

ZE:Zero, PS:Positive Small, PM:Positive Medium
PB:Positive Big, PV:Positive Very Big

(a) 퍼지규칙
(a) Fuzzy rule



(b) 임계값 결정
(b) Threshold value output

그림 5. 퍼지규칙과 임계값 결정
Fig. 5. Fuzzy rule and threshold value output

선정된 임계값을 이용하여 얻어진 이진화 영상 데이터와 초음파 센서 데이터를 같은 격자지도에 융합하여 나타내는 방법으로 장애물을 감지하는데 전체 흐름도는 그림 6과 같다.

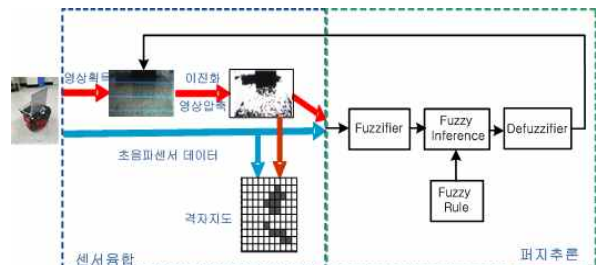


그림 6. 장애물 감지 흐름도
Fig. 6. Flow chart for obstacle detection

카메라가 감지할 수 있는 이동로봇의 전면을 격자지도로 나타낸 후 각 셀(cell)은 카메라에 의해 감지된 장애물이 있으면 셀을 채우고 초음파센서에 의해 감지된 데이터를 그 위에 중첩하여 장애물에 대한 격자지도를 그림 7과 같이 만든다. 이 때 소수의 셀에 나타나는 데이터는 적절히 무시하고 이 격자지도는 이동로봇이 주행하면서 주기적으로 갱신한다.

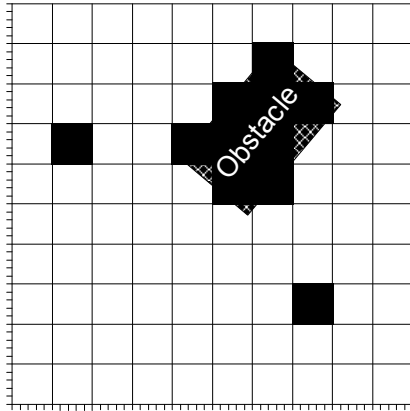


그림 7. 격자지도상에 센서 융합에 의한 장애물 표시
Fig. 7. Obstacle expression on the grid map by sensors fusion

IV. 경로계획과 주행

이동로봇이 목적지를 향하여 주행할 때 직면하는 장애물은 원궤적 경로(circular path)기법을 적용하여 회피하도록 한다[12]. 이동로봇의 이동경로가 목적지를 향하지 않을 때 이동로봇과 목적지 사이를 직선으로 연결한 가상 목적지(virtual goal)를 설정한다. 그림 8과 같이 이 목적지를 통과하는 원궤적을 생성하여 이동로봇이 원궤적 경로를 따라 주행하도록 한다. 원궤적의 크기는 이동로봇이 안정하게 주행할 수 있도록 정한다.

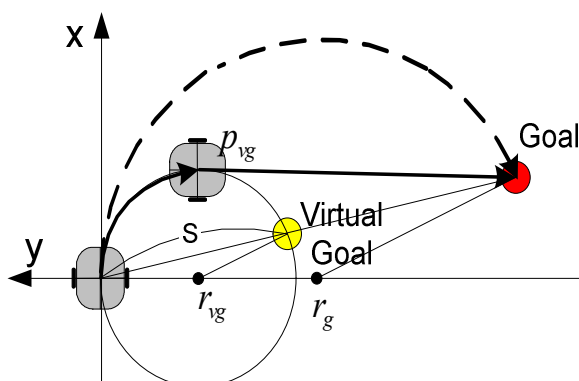


그림 8. 원궤적 상의 가상 목적지
Fig. 8. Virtual goal on the circular path

주행 중에 장애물이 탐지되면 이동로봇은 장애물을 전방 또는 후방의 왼쪽 또는 오른쪽으로 회피하도록 한다. 장애물을 회피하기 위한 궤적은 원궤적으로

하며 원 궤적의 크기는 장애물의 크기에 따라 가변적으로 정한다. 이동로봇의 현재 위치를 원점으로 하는 평면 좌표계에서 그림 9와 같이 왼쪽에 치우쳐 있는 장애물 왼쪽 끝 좌표를 $p_l = [x_{pl} \ y_{pl}]^T$ 이라 하고 오른쪽에 치우쳐 있는 오른쪽 끝 좌표를 $p_r = [x_{pr} \ y_{pr}]^T$ 이라 하자. 장애물 전방의 오른쪽 또는 왼쪽으로 이동로봇이 회피하기 위한 원의 중심을 각각 $r_l = [0 \ y_{rl}]^T$, $r_r = [0 \ y_{rr}]^T$ 이라 하면 다음 식이 성립된다.

$$y_{rl} = \frac{1}{2} \frac{\|p_l\|^2 - W^2}{y_{pl} + W} \tag{7}$$

$$y_{rr} = \frac{1}{2} \frac{\|p_r\|^2 - W^2}{y_{pr} - W} \tag{8}$$

여기서 W 는 이동로봇의 폭이다.

식 (7)과 (8)에서 $y_{rl} > 0$ 이면 이동로봇은 장애물의 왼쪽 전방으로 회피하고, $y_{rr} < 0$ 이면 오른쪽 전방으로 회피하도록 하며 회피반경 y_r 은 각각 $y_r \leq y_{rl}$, $y_r \geq y_{rr}$ 이 된다.

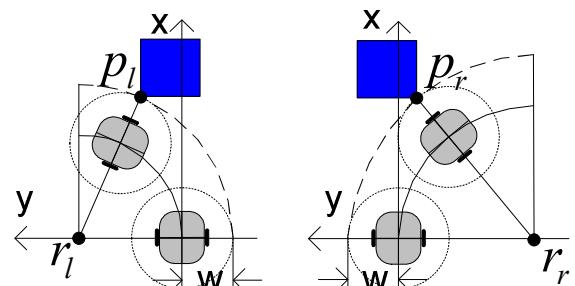


그림 9. 장애물 전면으로 회피하기 위한 원궤적 경로 생성
Fig. 9. Circular path generation for obstacle avoidance to the front side

그러나 이동로봇의 좌우측에 있는 장애물의 크기를 인지할 수 있으면 그림 10과 같이 장애물 후방의 왼쪽이나 오른쪽으로 회피하도록 하는데 회피반경은 각각 $0 > y_{rl} \geq y_r$, $y_r \geq y_{rr} > 0$ 로 주어진다.

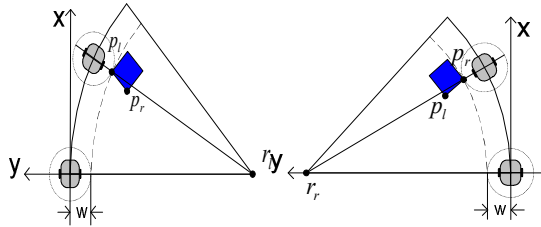


그림 10. 장애물 후면으로 회피하기 위한 원궤적 경로 생성
 Fig. 10. Circular path generation for obstacle avoidance to the rear side

이와 같이 생성된 장애물 회피경로 중 최적의 경로는 가상 목적지를 정하여 설정한 경로와 유사한 경로가 되므로 경로 오차를 다음과 같이 정의한다.

$$e = \left| \frac{1}{y_{reg}} - \frac{1}{y_r} \right| \tag{9}$$

식 (7)(8)로부터 장애물 회피반경 y_r 은 오차 e 가 최소가 되는 값으로 정한다. 그림 (11)과 같은 경우 회피경로 원 p_1 과 p_2 중에서 식 (7)(8)의 조건으로부터 p_1 이 선택된다.

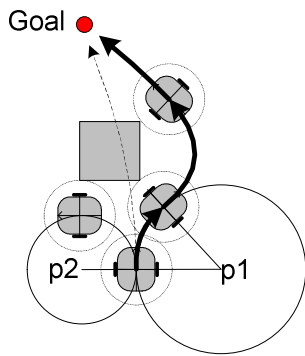


그림 11. 장애물을 회피하기 위한 경로 선택
 Fig. 11. Path selection for obstacle avoidance

원 경로를 따라 이동하는 로봇의 선속도는 다음과 같이 원의 반지름의 제곱근으로 정해지며 한계속도를 넘지 않도록 제한된다.

$$v_t = \sqrt{\frac{F}{m}} r = \gamma \sqrt{r} \tag{10}$$

여기서 F 는 구심력이고 m 은 이동로봇의 질량이다.

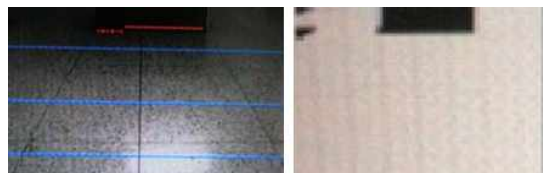
V. 실험

제안된 기법의 성능을 입증하기 위한 실험을 그림 12와 같은 Active Media사의 Pioneer 2-DX 이동로봇에 대하여 수행하였다. 이동로봇위에 640×480 [pixels]인 단일 카메라가 장착되었으며 8개의 초음파센서가 전면에 부착되어 있다. 영상의 크기는 $\frac{1}{25}$ 로 압축하였고 목적지까지의 거리는 5[m], 가상목적지의 거리는 0.5[m]로 정하였으며 이동로봇의 최대 선속도는 200[mm/s]로 설정하였다.



그림 12. Pioneer 2-DX 이동 로봇
 Fig. 12. Pioneer 2-DX mobile robot

이진화 영상의 임계값을 가변시키면 장애물 인식이 향상되는 실험결과를 그림 13에 나타내었다. 그림 13(a)는 이진화 영상의 임계값 0~255사이의 값 중 30일 때의 영상이고 (b)는 60일 때, (c)는 90인 경우이다. 이 경우 임계값을 낮게 설정하면 장애물 인식이 향상된다.



(a)

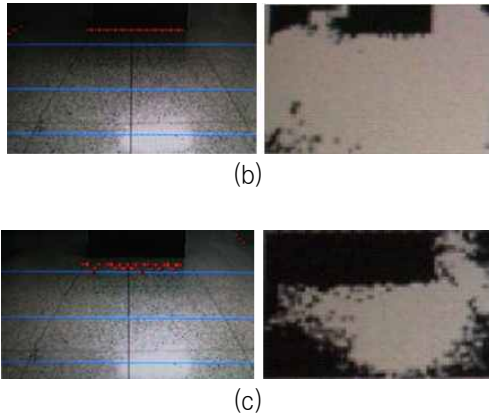
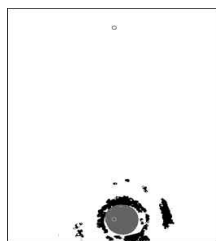


그림 13. 임계값 변화에 따른 장애물 인식결과
 Fig. 13. Obstacle detection results due to threshold value variation

그림 14는 실내조명이 어두운 환경에서 센서 융합 기법만 적용한 이동 로봇의 주행실험이다. 영상처리 시 그림자도 전방의 장애물로 인식하여 이를 회피하기 위해 계속해서 우회한다. 결국 출발점에서 목적지까지 주행 경로를 생성하지 못하고 출발점에서 맴돌게 된다.



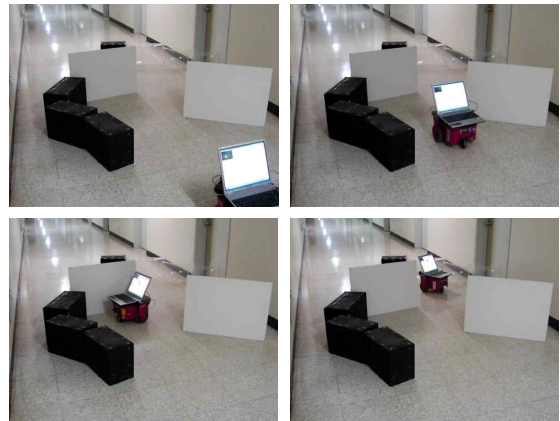
(a) 실험환경
 (a) Experimental environment



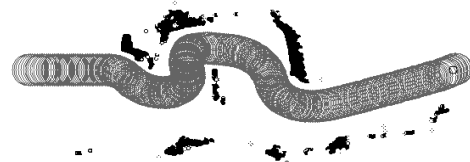
(b) 주행경로
 (b) Navigation path

그림 14. 센서 융합만에 의한 이동로봇의 주행 실험
 Fig. 14. Experiment result by only sensor fusion

그림 15(a)와 같이 실내 조명이 어두워 휘도가 낮은 환경에서 퍼지추론 기법을 적용하여 이진화 임계값을 결정하고 영상데이터와 초음파센서 데이터를 합성하여 장애물을 감지하고, 이를 회피하면서 목적지까지 이동하도록 하는 실험을 수행하였다. 생성된 경로를 따라 이동로봇이 이동한 경로를 그림 15(b)에 나타내었다.



(a) 실험환경
 (a) Experimental environment



(b) 주행경로
 (b) Navigation path

그림 15. 실내조명이 낮은 환경에서 제안된 기법을 사용한 주행실험

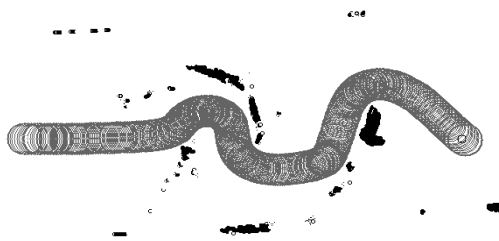
Fig. 15. Experiment by the proposed method in the indoor room with poor lights

그림 16(a)와 같이 폭이 2.6[m]인 복도에 장애물을 배치한 환경에서 이동로봇이 장애물을 회피하면서 목적지에 도달하는 실험을 수행하였다. 복도 조명이 6.3[m] 간격으로 배치되어 바닥에서의 빛의 반사가

많기 때문에 광학적 불확실성이 증가하게 된다. 흰색 장애물의 경우 그림자까지 발생하게 되는데 퍼지추론기법을 적용하여 이진화 임계값이 가변되기 때문에 장애물 인식이 개선되어 그림 16(b)와 같은 주행 경로로 목적지에 도달하였다. 두 가지 실험을 통하여 제안된 기법을 적용하면 광학적 불확실성이 있음에도 불구하고 장애물을 잘 인식하여 목적지에 도달할 수 있음을 확인하였다.



(a) 실험환경
(a) Experimental environment



(b) 주행경로
(b) Navigation path

그림 16. 좁은 복도에서의 주행실험
Fig. 16. Experiment by the proposed method in a narrow corridor

VI. 결 론

본 논문에서는 카메라와 초음파 센서 데이터를 융

합하여 장애물을 인지하고 원궤적 경로기법으로 회피하는 이동로봇 주행기법을 제안하였다. 카메라 영상을 이진화하기 위한 임계값은 퍼지 추론 기법으로 가변시킴으로써 휘도변화가 큰 환경에서도 장애물 인식률을 개선시키도록 하였다. 카메라 영상 정보와 초음파센서 데이터를 퍼지추론 시스템의 입력으로 하여 임계값을 생성시켰으며, 초음파 센서 데이터와 영상 처리 시스템에서 획득된 영상 데이터를 융합하여 격자 지도에 장애물 정보가 표시되도록 하였다. 인식된 장애물은 원 궤적 경로 계획 기법을 사용하여 회피하도록 하였다. 제안된 기법의 성능을 입증하기 위하여 Pioneer 2-DX 이동 로봇에 적용한 실험을 수행하였다. 제안된 기법은 실내조명이 어두워 휘도가 낮은 환경에서도 투명한 장애물도 인식할 수 있으며 복도와 같은 좁은 환경에서 그림자가 있는 경우에도 장애물을 잘 인식하고 회피하여 목적지에 도달함을 확인하였다. 따라서 본 연구에서 제안한 기법은 휘도 변화가 있으며 다양한 종류의 장애물도 잘 인식하고 이를 회피하여 실내 환경에서 이동로봇의 주행제어에 활용할 수 있다.

참 고 문 헌

- [1] N. Sariff and N. Buniyamin, "An overview of autonomous mobile robot path planning algorithms," *SCOReD 4th Student Conf. Research and Development*, pp.183-188, June, 2006.
- [2] Y. Koren and J. Borenstein, "Potential field methods and their inherent limitations for mobile robot navigation," *Proc. IEEE Conf. Robotics and Automation Sacramento*, pp.1398-1404, April, 1991.
- [3] S. S. Ge and Y. J. Cui, "New potential functions for mobile robot path planning," *IEEE Trans. Robotics and Automation*, vol.16, No.5, October, 2000.
- [4] D. H. Kim, J. H. Park and J. H. Kim, "Limit-cycle navigation method for soccer robot," *International Conf. Computational Intelligence, Robotics and*

Autonomous Systems, 2001.

- [5] R. Grech and S. G. Fabri, "Trajectory tracking in the presence of obstacles using the limit cycle navigation method," *Proc. 13th Conf. Control and Automation*, pp.101-106, June, 2005.
- [6] J. Minguez and L. Montano, "Nearness diagram (ND) navigation-collision avoidance in troublesome scenarios," *IEEE Trans. Robotics and Automation*, vol.20, pp.45-59, Feb., 2004.
- [7] 한성민, 이강웅, "원래적 경로기법을 이용한 이동로봇의 주행," *제어로봇시스템학회 논문지*, 14 권, 8호, pp. 1-6, 2008.8.
- [8] S. Vitabile, G. Pilato, F. Pullara and F. Sorbello, "A navigation system for vision-guided mobile robots," *Proc. International Conf. Image Analysis and Processing*, pp.566-571, Sept., 1999.
- [9] G. Cheng and A. Zelinsky, "Real-time visual behaviors for navigating a mobile robot," *Proc. IEEE/RSJ International Conf. Intelligent Robotics and Systems*, vol.2, pp.973-980, Nov., 1996.
- [10] R. HoseinNezhad, B. Moshirl and M. R. Asharif, "Sensor fusion for ultrasonic and laser arrays in mobile robotics: A comparative study of fuzzy, Demster and Bayesian approaches," *Proc. IEEE International Conf. Sensors*, vol.2, pp.1682-1689, June, 2002.
- [11] Q. Yang, K. Yuan, J. Li and H. Wang, "A Histogram sensor fusion method for mobile robots," *Proc. IEEE International Conf. Information Acquisition*, pp.339-343, June, 2004.
- [12] K. Kapach and Y. Edan, "Evaluation of grid-map sensor fusion mapping algorithms," *Proc. IEEE International Conf. Systems, Man and Cybernetics*, pp.829-834, October, 2007.
- [13] L. X. Wang, A course in fuzzy systems and control, *Prentice Hall*, 1997.

장기동 (張基東)



2005년 8월 : 한국방송통신대학교
컴퓨터과학과(이학사)
2008년 2월 : 성균관대학교
컴퓨터공학과 석사
2011년 9월 현재 : 한국항공대학교
항공전자공학과 박사과정
관심분야 : 이동로봇 제어

박상건 (朴常建)



2007년 2월 : 수원대학교 전자공학과
(공학사)
2010년 2월 : 한국항공대
학교항공전자공학과 석사
관심분야 : 이동로봇제어

한성민 (韓成玟)



2007년 2월 : 한국항공대학교
항공전자공학과(공학사)
2009년 2월 : 한국항공대학교
항공전자공학과 석사
관심분야 : 이동로봇 제어

이강웅 (李康熊)



1980년 2월 : 한국항공대학교
항공전자공학과(공학사)
1982년 2월 : 서울대학교
전자공학과(공학석사)
1983년~1984년 삼성전자 컴퓨터
개발부
1989년 2월 : 서울대학교

전자공학과(공학박사)

1994년~1995년 미시간주립대학교 방문교수

1989년~현재 한국항공대학교 항공전자 및 정보통신
공학부 교수

관심분야 : 로봇제어, 비선형제어