

복잡한 환경에서 자율이동 로봇의 문 통과 방법

서민욱, 김영중, 임묘택
고려대학교 전기공학과

Traversing A Door For Mobile Robot In Complex Environment

Min-Wook Seo, Young-Joong Kim and Myo-Taeg Lim
Department of Electrical Engineering, Korea University

Abstract - This paper presents a method that a mobile robot finds location of doors in complex environments and safely traverses the door. A robot must be able to find the door in order that it achieves the behavior that is scheduled after traversing a door. PCA(Principle Component Analysis) algorithm using the vision is used for a robot to find the positions of door. Fuzzy controller using sonar data is used for a robot to avoid a obstacle and traverse the doors.

상(Positive Image)과 문이 아닌 영상(Negative Image)을 추출한다. 여기서 얻은 모든 영상이 고유 공간에서 사용될 기본(Basis) 영상이 된다.

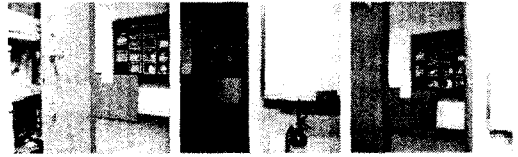


그림 1. 문 영상(Positive Image)

1. 서 론

자율이동 로봇이 건물 내부에서 어떠한 목적을 수행하기 위해서는 많은 하위의 행동(sub task)들이 요구된다 [1]. 로봇이 건물 내부의 지도(Map building)를 작성하기 위해서는 복도의 장애물을 기본적으로 피할 수 있어야 하고 복도의 문(Door)을 잘 인식 할 수 있어야 한다[2]. 로봇이 문을 찾는 방법에 대해서 현재까지 진행된 연구를 살펴보자. 가장 간단하게 문을 찾는 방법은 문 색상의 정보를 이용하는 방법이 있다. 이러한 방법은 빛에 대한 외란이 심하고 문과 동일한 색상의 물체가 주변에 존재할 경우에 문을 찾기가 쉽지 않다[3]. 로봇이 건물의 복도에서 문을 찾기 위해 영상 이미지에 대한 수직성분(Vertical Line)을 이용한 연구도 진행 중인데, 이와 같은 방법은 영상이미지를 분석할 경우 문 이외의 수직성분이 많이 존재하거나, 또는 로봇이 사무실 내부에서 복도로 나가기 위해 문을 인식해야하는 경우에는 로봇이 문을 찾기가 쉽지 않다[4][5]. 본 논문에서는 자율이동 로봇이 복잡한 환경의 사무실 내부에서 복도로 나가기 위해 문을 찾고 통과하는 방법에 대해 제안한다. 로봇이 문을 찾는 방법에 대해서는 영상 이미지를 고유 공간(Eigen space)으로 투영시키는 PCA(Principle Component Analysis) 알고리즘[6]을 적용하여 해결한다. PCA 알고리즘의 응용은 얼굴인식이나 패턴인식 분야에서 활발히 연구되어져 왔고 고차원(High dimension)데이터 분석에 유용하다. 로봇이 장애물을 피해 문을 통과하는 방법에 대해서는 초음파 센서의 데이터를 이용한 퍼지 제어기를 설계함으로써 해결한다.



그림 2. 문이 아닌 영상(Negative Image)

2.2 고유 공간으로 투영 (Eigen Space Projection)

기본 영상을 고유 공간으로 투영하게 되면 기본 영상에 대한 고유벡터(Eigen vector) 성분을 이용할 수가 있는데 이 원리를 이용하여 기본 영상에 대한 특징 정보를 얻을 수가 있다. 기본 영상에 대한 고유 공간으로의 투영은 각각의 기본영상과 기본영상 전체에 대한 평균과의 차에 의해서 차 이미지를 벡터(Vector)화 시키고, 차 영상 벡터들의 집합인 차 행렬(Matrix)에 대한 공분산(Covariance) 행렬을 구함으로써 가능해진다.

먼저 $w \cdot h$ 의 2차원 영상을 N by 1 ($N := w \cdot h$) 벡터로 만든다. 그리고 각각의 기본 이미지를 $\Gamma_1, \Gamma_2, \Gamma_3, \dots, \Gamma_M$ ($\Gamma \in R^N$) 라고 놓자. M 개의 기본 영상으로 벡터 평균 ψ 을 식(1)과 같이 구하고,

$$\psi = \frac{1}{M} \sum_{n=1}^M \Gamma_n \tag{1}$$

각각의 기본 영상에 대한 차 벡터를 (2)식과 같이 구할 수가 있다.

$$\phi_i = \Gamma_i - \psi \tag{2}$$

$\phi_1, \phi_2, \phi_3, \dots, \phi_M$ 은 각각 N by 1 벡터가 되고 (3)식에 의해서 공분산행렬 C 을 구할 수 있다. 여기에서 차 행렬 $A = [\phi_1, \phi_2, \phi_3, \dots, \phi_M]$ 로 정의하자.

$$C = \frac{1}{M} \sum_{n=1}^M \phi_n \phi_n^T = \frac{1}{M} A A^T \tag{3}$$

C 는 N by N 행렬이 되어 C 에 대한 고유값(Eigen value)과 고유벡터(Eigen Vector)를 구하기가 힘들기 때문에 (4)식과 같이 C' 을 이용한다.

$$C' = \frac{1}{M} \sum_{n=1}^M \phi_n^T \phi_n = \frac{1}{M} A^T A \tag{4}$$

(4)식을 이용하게 되면 C' 은 M by M 행렬이 되어 간단히 고유값과 고유벡터를 구할 수가 있다. C' 의 고유값 행렬 Λ 과 고유벡터 행렬 V 은 다음과 같이 표현 된다.

2. 문 인식(Door Recognition)

2.1 고유 공간 투영을 위한 전처리

CCD 카메라를 통해서 들어온 영상 데이터를 고유 공간(Eigen space)으로 투영시키는 과정에 있어서 한 프레임에 해당하는 영상 데이터(640 . 480 픽셀)양이 너무 크기 때문에 데이터양 을 줄일 필요가 있다. 640 . 480 픽셀의 영상을 그대로 사용하면 처리해야 하는 불필요한 데이터의 양이 너무 많아져 제한된 로봇의 하드웨어 성능으로는 실시간(Real Time)으로 로봇을 구현하기가 힘들다. 640 . 480 픽셀의 영상을 축소하여 160 . 120 픽셀의 영상으로 만든 후 Sobel Mask를 통하여 윤곽선 검출(Edge Detection)을 한다. 이러한 과정을 통하여 문 영

$$A = [\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \dots, \lambda_M], (\lambda_1 > \lambda_2 > \dots > \lambda_M)$$

$$V = [v_1, v_2, v_3, \dots, v_M], v \in R^M \quad (5)$$

그리고 (6)식을 통해서 기본영상이 고유 공간으로 어떻게 투영 되는지를 확인 할 수 있다.

$$E = AV \quad (6)$$

E (N by M)행렬의 열(Column)벡터들은 각각의 고유공간을 벡터화 시켜서 나타낸 것이고, E_m 에서 n 이 증가할수록 고유값의 크기가 작아지기 때문에 고유 공간을 표현하는 중요성이 감소하게 된다. 그림3은 본 논문에서 사용 되어지고 있는 고유 공간 영상 중 $\lambda_1 \sim \lambda_8$ 에 해당하는 고유 공간 영상을 나타낸 것이며 20개의 Positive 기본 영상과 40개의 Negative 기본 영상으로 구성하였다.

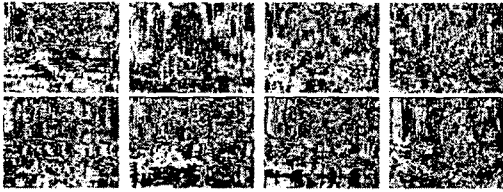


그림 3. 고유 공간(Eigen space, $\lambda_1 \sim \lambda_8$)

2.3 고유 공간을 이용한 문 인식

2.2 과정을 통해서 구한 고유 공간 영상을 이용하여 기본영상으로 재 합성을 할 수 있다. 즉 실험에 사용된 기본 영상들은 고유 공간 영상들의 선형 조합으로 나타내어진다. 여기서 선형결합식의 계수행렬을 W 행렬 (Weight Matrix)이라고 정의하면 $EW = A$ 로 나타낼 수 있으며, $W = E^{-1}A$ 의 계산 과정을 통해서 W 를 구할 수 있다. E 의 각 열벡터들은 서로 Orthonormal 하기 때문에 $E^{-1} = E^T$ 로 나타낼 수 있으며 결과적으로 W 는 (7)식과 같이 정의된다.

$$W = E^T A \quad (7)$$

(8)식과 (9)식에 의해서 각각의 Positive 영상과 Negative 영상에 대한 Weight를 구할 수가 있다.

$$W_p = E^T \cdot \text{Basis Image(Positive)} \quad (8)$$

$$W_n = E^T \cdot \text{Basis Image(Negative)} \quad (9)$$

$W_p = [w_1, w_2, \dots, w_m], u \in R^N$ 에서 w 는 Positive영상 각각에 대한 Weight 벡터를 나타내며

$W_n = [w_1, w_2, \dots, w_m], w \in R^N$ 에서 w 는 Negative영상 각각에 대한 Weight 벡터를 나타낸다. CCD 카메라를 통해서 새로운 영상(I)이 들어왔을 경우 (10)식에 의해서 새로운 영상에 대한 Weight를 구할 수 있다.

$$w_k = E^T \cdot (I - \psi) \quad (10)$$

(11)식과 같이 모든 기본 영상에 대한 w 와 새로운 영상에 w_k 에 대해서 Euclidian distance를 구함으로써 새로운 영상이 Positive 영상에 해당하는지, 아니면 Negative 영상에 해당하는지를 알 수 있다.

$$\epsilon = \|w_i - w_k\|^2, (i=1,2,3, \dots, m+l) \quad (11)$$

(11)식에서 구한 ϵ 의 값 중에서 가장 작은 값에 해당하는 w_k 가 W_p 그룹에 속해있는지 W_n 그룹에 속해있는지를 판단하면 새로운 영상이 Positive 영상인지 Negative 영상인지를 알 수 있다. 그림4는 전체적인 영상 시스템의 흐름을 표현한다.

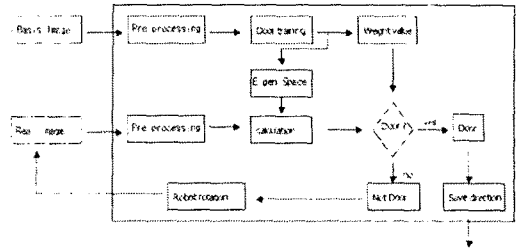


그림 4. 영상 시스템 흐름도

3. 로봇 제어기

3.1 퍼지 제어기의 구성

초음파 센서(Sonar Sensor)로부터 자율이동 로봇 주변의 거리정보를 입력받아서 로봇의 속도(Linear Velocity)와 Heading 각도(Angular Velocity)를 제어하는 퍼지제어기(Fuzzy Controller)를 구성함으로써 주변의 장애물을 피하면서 목표점 까지 주행하게 할 수 있다. 그림5는 로봇의 모양과 초음파 센서의 배치를 나타낸 것이다.

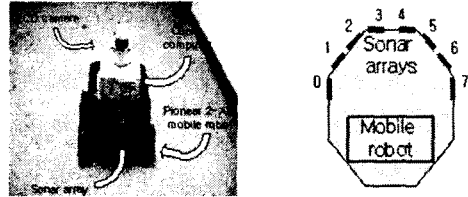


그림 5. 로봇 시스템

로봇의 속도는 장애물의 위치에 따라서 결정된다. 로봇의 전방이나 측면에 장애물이 있으면 속도는 느려지고 장애물이 없으면 속도는 빨라진다. 로봇 전방의 거리를 $D(k)$, 좌측-전방을 $L(k)$, 우측-전방을 $R(k)$ 로 표시하고 좌측거리와 우측거리의 차를 $SD(k)$, 좌측거리와 우측거리의 합을 $SA(k)$ 로 표시한다. (12)식에 의해서 각 방향에 대한 장애물까지의 거리를 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} D(k) &= \min(\text{sonar}(3), \text{sonar}(4)) \\ L(k) &= \min(\text{sonar}(1), \text{sonar}(2)) \\ R(k) &= \min(\text{sonar}(5), \text{sonar}(6)) \\ SD(k) &= L(k) - R(k) \\ SA(k) &= \text{sonar}(0) + \text{sonar}(7) \end{aligned} \quad (12)$$

표1은 속도 퍼지 제어기에 관한 제어규칙을 나타내며 그림6은 멤버십 (Membership Function) 함수를 나타낸다.

SD(k) \ D(k)	Negative	Zero	Positive
Near	Slow	Middle	Slow
Far	Middle	Fast	Middle

표 1. 속도(Linear Velocity) 제어 규칙

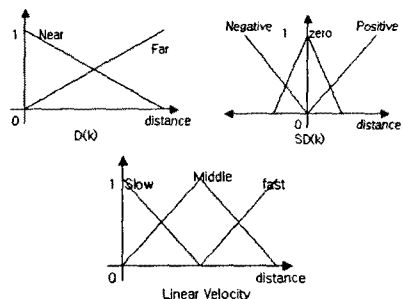


그림 6. 속도 제어기 멤버십 함수

표2 는 Heading 각도 퍼지 제어기에 관한 제어규칙을 나타내며 그림7 은 멤버쉽 함수를 나타낸다.

	SD(k)	Negative	Zero	Positive
D(k)				
Near		Small Right(S.R)	Zero	Small Left(S.L)
Far		Large Right	Zero	Large Left

표 2. Heading 각도 제어 규칙

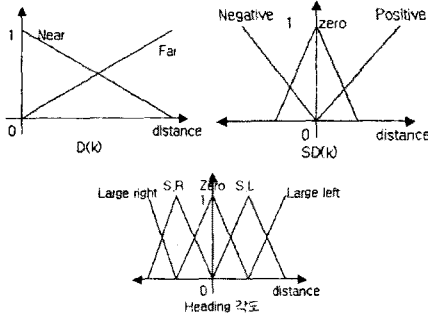


그림 7. Heading 각도 제어기 멤버쉽 함수

본 논문에서는 Mamdani 퍼지 추론 방법을 사용 하였고 무게중심법(Center of gravity)을 사용하여 비퍼지화(Defuzzification) 하였다. 로봇이 문을 통과하는 순간에 Heading 각도 제어기의 값이 크면 로봇이 문에 부딪히는 경우가 발생하기 때문에 이 경우에 대해서는 Heading 각도 제어기의 비퍼지화 값이 전체적으로 작게 적용되게 설계를 한다. $SA(k)$ 값을 통하여 문을 통과하는 순간을 알 수 있으며 (13)식과 같이 각 경우에 대해서 Heading 각도 제어기의 제한 각도가 달라지게 설계 한다. 기준 값 40cm는 로봇이 문을 통과할 때 로봇과 문 사이의 남은 공간 + α 값으로 정하였다.

$$\begin{cases} \text{Heading각도}(-\frac{\pi}{36} \sim \frac{\pi}{36})(\text{rad/step}), & \text{if } SA(k) \leq 40\text{cm} \\ \text{Heading각도}(-\frac{2\pi}{9} \sim \frac{2\pi}{9})(\text{rad/step}), & \text{if } SA(k) > 40\text{cm} \end{cases} \quad (13)$$

3.2 전체 시스템

2.3절을 통해서 로봇 위치로부터 문의 방향을 알 수가 있으며 3.1절에서 설계한 로봇 제어기를 사용하여 장애물을 피하면서 문을 통과할 수가 있다. 그림8은 문을 통과하기위한 로봇행동(behavior)에 대한 흐름도(flow chart)를 나타낸다.

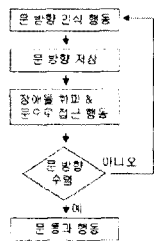


그림 8. 로봇 행동 흐름도(Flow chart)

4. 실험

실험 영상 중 일부분이 그림1과 그림2에 소개되고 있다. 영상을 통하여 문을 찾는 과정에서 Positive 영상 20개와 Negative 영상 40개를 연구실 내부에서 위치를 옮겨가며 실험 로봇에 장착 되어있는 CCD카메라를 통하

여 획득 하였으며 초음파 센서의 데이터가 정확성이 떨어지는 특성 때문에 최대 측정 가능 거리를 실험 공간에 고려하여 3m로 제한하였다. 그리고 초음파 데이터를 퍼지 제어기의 입력으로 사용하기 전 데이터의 신빙성을 높이기 위해 각 초음파 센서마다 한번에 10개의 데이터를 평균하여 퍼지 제어기의 입력으로 사용 하였다. 초음파 센서의 송수신 속도는 251Hz/sec이다. 실험에 사용한 모바일 로봇의 폭은 50cm 이며 문의 폭은 80cm 이다. 표3은 로봇이 a, b, c 각 위치별로 제자리에서 360도 회전할 때 문의 위치를 정확히 찾을 수 있는지에 대한 실험 결과이다. 각 위치에서 30회 실험을 시행 하였고 문일 경우에는 100% 문으로 인식 하였다.

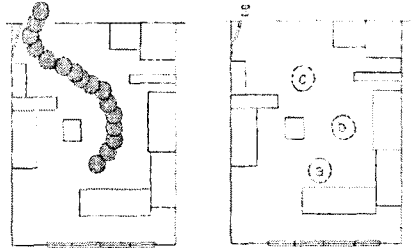


그림 9. 로봇주행 실험결과 그림 10. 실험 환경도

로봇의 초기위치	문일 경우 문이 아니라고 판단	문이 아닌데 문이라고 판단
a	0% (0/30)	0% (0/30)
b	0% (0/30)	0% (0/30)
c	0% (0/30)	0% (0/30)

표3. 실험 결과

5. 결 론

본 논문에서는 자율이동 로봇이 복잡한 환경에서 영상 시스템을 사용하여 실시간으로 문을 찾고 장애물을 피하면서 안전하게 문을 통과하는 방법에 대하여 제안 하였다. PCA알고리즘을 적용한 결과 문을 인식하는 과정에 있어서 우수한 성능을 확인할 수 있었다. 로봇이 건물 내부에서 모든 사무실의 문을 인식하기 위해서는 각각의 문에 대한 기본 영상을 획득하여 PCA알고리즘을 적용시켜야 하는 불편함이 있지만 문의 구조가 모두 같고 문 주위의 모양이 모두 같으면 실제 환경에 바로 적용 시켜도 전혀 문제가 없다고 본다. 향후에는 로봇이 문을 통과하는 방법에 대해서도 우수한 성능을 얻을 수 있게 로봇 주행 제어기를 설계하는 연구가 요구된다.

[참 고 문 헌]

- [1] naoyuki kubota, "perceptual system and action system of a mobile robot with structured intelligence", iee, p1562 1567, 2002
- [2] sascha a. stoeter, "real time door detection in cluttered environments", international symposium on intelligent control, 15th pl87 192, July 2000.
- [3] p.amir, door identification, http://www formal.stanford.edu/eval/cs223b/report.html, 1999.
- [4] inaki monasterio, "learning to traverse doors using visual information", mathematics and computers in simulation", 60th, p347 356, 2002.
- [5] c.eberst inst., "vision based door traversal for autonomous mobile robots", international conference on intelligent robots and systems, p620 625, 2000.
- [6] matthew turk, alex pentland, "eigenfaces for recognition", j. cognitive neuroscience, Vol.2, no.1, p71 86, 1991.