

Door Traversing for A Mobile Robot in Complex Environment

徐民旭[†] · 金瑛中^{*} · 林畝澤^{**}

(Min-Wook Seo · Young-Joong Kim · Myo-Teag Lim)

Abstract - This paper presents a method that a mobile robot finds location of doors in complex environments and safely traverses the door. PCA(Principal Component Analysis) algorithm using the vision information is used for a robot to find the location of door. PCA is a useful statistical technique that has found application in fields such as face recognition and image compression, and is a common technique for finding pattern in data of high dimension. Fuzzy controller using a sonar data is used for a robot to avoid obstacles and traverse the doors.

Key Words : PCA, ROBOT, DOOR, FUZZY, VISION

1. 서 론

산업이 발달함에 따라 많은 산업기계 제품이 생산되었고 인간은 보다 안락한 생활을 하게 되었다. 대표적인 산업기계는 로봇이라고 할 수 있다. 기존의 로봇은 주로 산업용 로봇 분야에서 사람의 팔을 닮은 제조업용 로봇을 지칭하는 경우가 많다. 즉, 자동차 혹은 전자제품을 생산하기 위해 자동화 라인에서 사용되는 로봇 혹은 사람을 대신하여 무거운 물건을 옮겨주거나 단순 반복 작업을 대신해주는 로봇을 의미했다. 그러나 로봇의 사용범위가 확대되고 목적이 다양화됨에 따라 산업용 로봇과 인간 공존형 로봇으로 구별할 수 있고, 산업용 로봇은 제조업용 로봇과 비제조업용 로봇으로, 인간 공존형 로봇은 개인용 로봇과 공공용 로봇 등으로 분류 되고 있다. 또한 산업용 분야의 비제조업용 로봇과 인간 공존형 로봇을 포괄하여 지능형 서비스 로봇으로 분류하기도 한다.

기존의 산업용 로봇이 사고의 위험 때문에 별도의 격리된 지역의 작업공간에서 작업을 수행하도록 하였으나 이러한 산업용 로봇이 시장의 확대에 한계를 느끼고 정보통신을 기반으로 한 디지털 사회를 향한 발전이 기대되면서 사람과 함께 동일한 공간에서 생활하면서 사람에게 즐거움과 필요

한 서비스를 제공할 수 있는 로봇의 필요성이 대두되었다. 이와 같이 사람과 동일한 공간에서 사용될 수 있는 로봇을 인간 공존형 로봇이라 한다. 그 예로서, 집안에서 사용할 수 있는 가정용 로봇, 박물관이나 공공건물에서 방문자를 안내할 수 있는 안내 로봇, 집안에서 애완동물처럼 생활할 수 있는 장난감 로봇 등이 대표적인 예이다[1]. 이러한 공존형 로봇의 대부분이 자율이동로봇 분야에 속한다. 대부분의 이동 로봇은 주위의 환경을 인식 할 수 있는 센서부와, 의사결정을 할 수 있는 중앙처리부, 이동을 위한 구동부로 나뉘어 진다. 이동로봇이 시각 센서를 사용하여 영상정보를 얻고 이 정보로부터 의사결정을 하고 구동하는 것을 영상 구동(Visual servoing)이라고 한다[2]. 현재 연구되는 대부분의 이동로봇은 시각 센서를 가지고 있지만 주변 환경의 변화에 민감하게 동작하기 때문에 시각센서의 정보를 다루는 분야에 대해서 많은 연구가 되어왔고[4][5][6][7] 앞으로도 꾸준히 이러한 연구가 요구된다. 최근에는 인공지능에 관한 연구가 많이 행해지고 있으며 로봇의 의사결정 분야에 인공지능 기술이 접목됨으로 인하여 로봇의 성능개선에 많은 기여를 하고 있다[3]. 대부분의 로봇이 의사결정이 행동단위로 이루어지기 때문에 기본적인 행동구조 하나하나가 중요시되며 이러한 행동단위가 모여서 이동로봇은 큰일을 할 수 있다. 간단히 예를 들어 로봇이 보안행동을 하기 위해서는 낮은 사람을 판별 할 수 있는 행동이 먼저 이행되어야 하며, 서비스 활동을 위해서 수행할 경우에 로봇은 자신의 위치를 정확히 인식하는 행동을 해야 한다. 그리고 지도생성(Map building)이나 자율이동(Navigation) 행동을 위해서 로봇은 장애물을 피할 수 있는 행동을 할 수 있어야 하며 사무실과

[†] 교신저자, 正會員 : 현대자동차 연구원
E-mail : s1hanul@korea.ac.kr

^{*} 正會員 : 고려대학교 전기공학부 박사과정

^{**} 正會員 : 고려대학교 전기전자전파공학부, 정교수

接受日字 : 2005年 1月 10日

最終完了 : 2005年 3月 12日

복도사이에 설치된 문을 통과하는 행동을 할 수 있어야 한다.

일반적으로 문은 사각형 모양이고 손잡이가 달려있다. 이러한 사실을 바탕으로 사람들은 낯선 건물에 들어갔을 때도 경험과 직관에 의해서 쉽게 문을 찾을 수 있다. 하지만 로봇이 시각센서를 사용하여 방 안에서 복도로 나오기 위해 스스로 회전하며 문을 찾는 일은 쉽지가 않다. 그래서 시각정보를 이용하여 문을 찾는 문제를 해결하기 위해 연구가 계속 진행되어지고 있다. 문의 수직라인을 분석하여 문을 찾는 연구가 이행 되어졌고[4][5], 문의 색상을 이용하는 연구도 진행되어 왔다[6]. 하지만 이러한 연구들은 많은 문제점을 가지고 있다. 문의 수직성분을 이용하여 문을 찾는 경우에 문 이외의 물체에서 수직라인이 많이 생성되는 환경에서는 문을 찾기가 힘들게 되고, 색상을 이용한 방법은 문과 같은 색상의 물체가 존재하면 문을 찾기가 힘들다. 또한 색상을 이용한 방법은 빛의 변화에 매우 민감하기 때문에 실제 적용하기가 쉽지 않다. 그리고 로봇이 복도에서 문을 찾는 주제도 연구 되어져 왔다[7].

본 논문은 자율 이동로봇이 문을 잘 찾고 안전하게 통과하는 행동에 대해서 연구한 것이며 로봇의 문 찾는 행동에 관한 성능을 높이기 위하여 PCA(Principal Component Analysis)알고리즘 사용을 제안한다. 초음파 센서의 데이터를 입력으로 사용하고 로봇의 속도와 회전 각도를 제어하는 로봇 퍼지제어기를 구성함으로써, 기존연구[4]와 비교실험을 통하여 문 찾는 능력에 대한 성능향상을 입증한다.

2. 본 론

2.1 PCA 알고리즘을 이용한 문 인식

CCD 카메라를 통해서 들어온 영상 데이터를 고유 공간(Eigen space)으로 투영 시키는 과정에 있어서 한 프레임에 해당하는 영상 데이터(640 × 480 픽셀)양이 너무 많기 때문에 제한된 하드웨어의 성능을 가지고 실시간(Real time)으로 동작 할 수 있게 구현하기는 힘들다. 따라서 (640 × 480 픽셀)의 영상을 축소하여 (160 × 120 픽셀)의 영상으로 만든 후 소벨 마스크를 통하여 윤곽선 검출을 한다. 이러한 과정을 통하여 문 영상(Positive image)과 문이 아닌 영상(Negative image)을 추출한다. 이하 본 논문에서는 문이 포함되어있는 영상을 Positive image, 문이 포함되어있지 않은 영상을 Negative image라고 정의한다. 여기에서 얻은 모든 영상이 고유공간에서 사용될 기본(Basis) 영상이 된다. 그림 2-1에 실험에 사용된 Positive image 일부분이 표시되어져 있고 그림 2-2에 Negative image 일부분이 나타나있다.

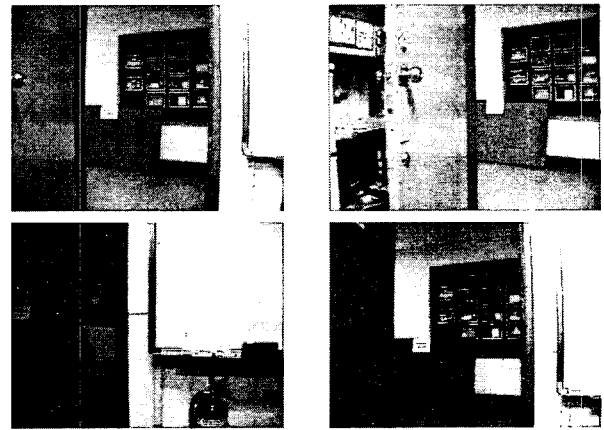


그림 2-1 문 영상(Positive images)
Fig. 2-1 Positive door images

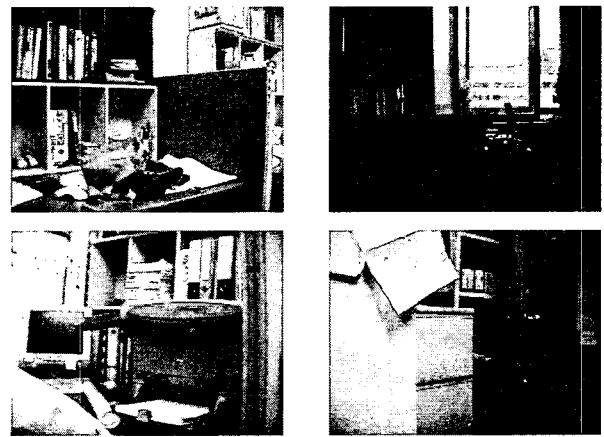


그림 2-2 문이 아닌 영상(Negative images)
Fig. 2-2 Negative door images

2.1.1 고유 공간으로 투영(Eigen space projection)

기본 영상을 고유 공간으로 투영하게 되면 기본 영상에 대한 고유벡터(Eigen vector)성분을 이용할 수가 있으며 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 가능해 진다[8][9].

먼저 $w \times h$ 의 2차원 영상을 N by 1($N := w \times h$) 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 벡터평균 Ψ 을 식 (2.1)와 같이 구하고,

$$\Psi = \frac{1}{M} \sum_{n=1}^M \Gamma_n \quad (2.1)$$

각각의 기본 영상에 대한 차 벡터를 식 (2.2)과 같이 구할 수가 있다.

$$\Phi_i = \Gamma_i - \Psi \quad (2.2)$$

$\Phi_1, \Phi_2, \Phi_3, \dots, \Phi_M$ 은 각각 N by 1 벡터가 되고 (2.3)식에 의해서 공분산행렬 C 를 구할 수 있다. 여기에서 차 행렬 $A = [\Phi_1, \Phi_2, \Phi_3, \dots, \Phi_M]$ 로 정의한다. 따라서,

$$C = \frac{1}{M} \sum_{n=1}^M \Phi_n^T \Phi_n = \frac{1}{M} A^T A \quad (2.3)$$

C 의 고유값 행렬 Λ 와 고유벡터 행렬 V 는 (2.4)식과 같이 나타난다.

$$\begin{aligned} \Lambda &= [\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \dots, \lambda_M] \\ V &= [v_1, v_2, v_3, \dots, v_M], v \in R^M \end{aligned} \quad (2.4)$$

그리고 식 (2.5)을 통해서 기본영상이 고유 공간으로 어떻게 투영 되는지를 확인할 수 있다.

$$E = AV \quad (2.5)$$

2.1.2 고유공간을 이용한 문 인식

2.1.1에서 기술한 과정을 통하여 구한 고유 공간 영상을 이용하여 기본영상으로 재합성을 할 수 있다. 즉 실험에 사용된 기본 영상들은 고유 공간 영상들의 선형 조합으로 나타내어진다. 여기서 선형결합식의 계수 행렬을 W 행렬 (Weight matrix)이라고 정의하면 $EW = A$ 로 나타낼 수 있으며, $W = E^{-1}A$ 의 계산 과정을 통해서 W 을 구할 수 있다. E 의 각 열벡터들은 서로 Orthonormal 하기 때문에 $E^{-1} = E^T$ 로 나타낼 수 있으며 결과적으로 W 는 식 (2.6)과 같이 정의된다.

$$W = E^T A \quad (2.6)$$

식 (2.7)과 식 (2.8)에 의해서 각각의 Positive 영상과 Negative 영상에 대한 W 행렬을 구할 수가 있다.

$$W_P = E^T \cdot \text{Basis image(Positive images)} \quad (2.7)$$

$$W_N = E^T \cdot \text{Basis image(Negative images)} \quad (2.8)$$

$W_P = [w_1, w_2, \dots, w_m]$, $w_i \in R^N$ 에서 w_i 는 Positive 영상 각각에 대한 가중치(Weight) 벡터를 나타낸다. CCD카메라를 통해서 새로운 영상(I)이 들어왔을 경우 식 (2.9)에 의해서 새로운 영상에 대한 가중치를 구할 수 있다.

$$w_k = E^T \cdot (\Gamma - \Psi) \quad (2.9)$$

식 (2.10)과 같이 모든 기본 영상에 대한 w_i 와 새로운 영상에 w_k 에 대한 Euclidian distance를 구함으로써 가장 작은 값을 가지는 ϵ 을 찾을 수 있는데 이때의 w_i 가 W_P 그룹에 속해있는지 W_N 그룹에 속해있는지를 판단하면 새로운 영상이 Positive 영상인지 Negative 영상인지를 알 수 있다.

$$\epsilon = \|w_i - w_k\|^2, (i=1,2,3, \dots, m+l) \quad (2.10)$$

그림 2-3는 전체적인 영상 시스템의 흐름을 표현한다.

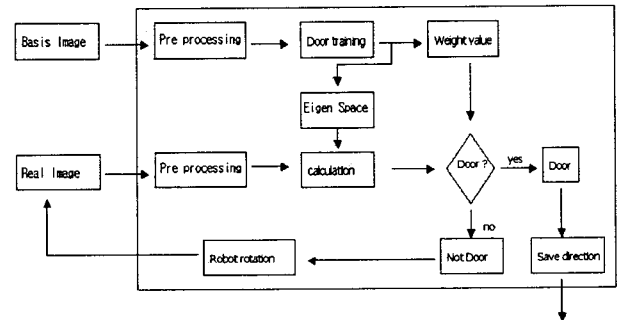


그림 2-3 영상 시스템 흐름도

Fig. 2-3 Flow diagram of image process

2.2 자율이동로봇의 주행 제어기

본 장에서는 자율이동로봇이 장애물을 피하면서 안전하게 문을 통과하는 행위를 할 수 있게 하기 위해 자율이동로봇의 속도를 제어하는 속도(Linear velocity)제어기와 회전 각도를 제어하는 헤딩각도(Heading angle)제어기를 설계한다 [10]. 퍼지 제어기를 구성함에 있어서 자율이동로봇의 속도 제어기와 헤딩각도 제어기의 퍼지 규칙들을 모든 상황에 맞게 세부적으로 구성하면 퍼지 규칙이 복잡해져서 계산량이 많아지는 단점이 있기 때문에 최소한의 퍼지 규칙으로 좋은 성능을 낼 수 있는 퍼지 제어기를 설계한다. 퍼지 제어기의 입력으로는 초음파 센서의 데이터를 사용하며 자율이동로봇의 초음파 센서 구성은 그림 2-4와 같다.

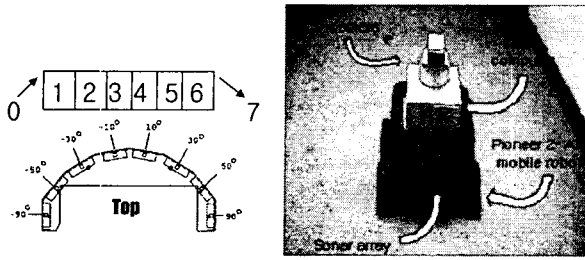


그림 2-4 초음파 센서의 구성
Fig. 2-4 Construction of sonar sensors

식 (2.11)에 퍼지제어기의 입력으로 사용될 입력 변수들이 나타나있다.

$$\begin{aligned}
 D(k) &= \min(\text{sonar}(3), \text{sonar}(4)) \\
 L(k) &= \min(\text{sonar}(1), \text{sonar}(2)) \\
 R(k) &= \min(\text{sonar}(5), \text{sonar}(6)) \\
 SD(k) &= L(k) - R(k) \\
 SA(k) &= \text{sonar}(0) + \text{sonar}(7)
 \end{aligned}
 \tag{2.11}$$

여기에서 $D(k)$ 는 전방 장애물을 인식하는 입력변수로 사용되고, $L(k)$ 는 로봇의 좌측 물체로부터 로봇까지의 거리, $R(k)$ 는 로봇의 우측 물체로부터 로봇까지의 거리, $SD(k)$ 는 로봇이 주행방향에 대하여 좌측으로 치우쳤는지 우측으로 치우쳤는지를 판별하는 변수이고, $SA(k)$ 는 로봇이 문을 통과할 때 문을 인식하기 위해 사용이 된다. 표1은 속도 퍼지제어기의 제어규칙을 보여주며 로봇의 전방이나 측면에 장애물이 있으면 속도는 느려지고 장애물이 없으면 속도가 빨라지게 된다. 그리고 표2는 헤딩각도 퍼지제어기의 제어규칙으로서 로봇의 좌측에 장애물이 있으면 우측으로 회전하고, 우측에 장애물이 있으면 좌측으로 회전하는 제어규칙을 나타내며 장애물이 가까이 있을 경우에는 회전각을 더욱 크게 하여 회전하게 된다. 그림 2-5는 속도에 대한 퍼지입출력 멤버십 함수를 나타내며 그림 2-6은 헤딩각도에 대한 퍼지입출력 멤버십 함수를 나타낸다.

표 1 속도(Linear velocity)제어기의 제어규칙
Table 1 Linear velocity rule

		$SD(k)$		
		N	Z	P
$D(k)$	Near	S	M	S
	Far	M	F	M

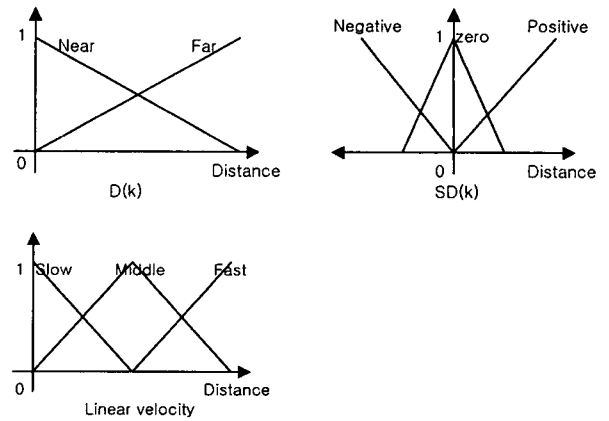


그림 2-5 속도에 대한 퍼지 입출력 멤버십 함수
Fig. 2-5 Membership function of Linear velocity

표 2 헤딩각도(Heading angle) 제어기의 제어규칙
Table 2 Heading angle rule

		$SD(k)$		
		N	Z	P
$D(k)$	Near	LR	Z	LL
	Far	SR	Z	SL

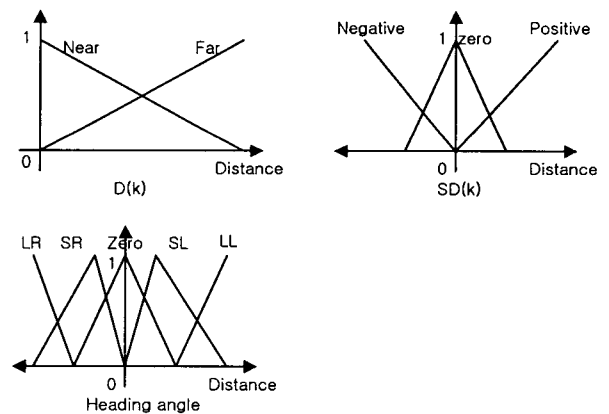


그림 2-6 헤딩각도에 대한 퍼지 입출력 멤버십 함수
Fig. 2-6 Membership function of Heading angle

로봇이 문을 통과하는 순간에 회전각도 제어기의 값이 크면 로봇이 문에 부딪히는 경우가 발생하기 때문에 이 경우에 대해서는 회전각도 제어기의 비퍼지화 값이 전체적으로 작아지도록 설계된다. 위에서 설명한 $SA(k)$ 값을 사용함으로써 로봇은 문을 통과하는 순간을 알 수 있으며, 식 (2.12)처럼 각 경우에 대해서 회전각도 제어기의 제한 각도가 변화되게 설계한다. 기준값(Threshold) 40cm는 로봇이 문을

통과할 때 로봇과 문 사이의 남는 공간과 약간의 여분 α 값으로 설정을 하였다.

$$\begin{cases} \text{Heading}(-\frac{\pi}{36} \sim \frac{\pi}{36})(\text{rad/step}) & , \text{ if } SA(k) \leq 40\text{cm} \\ \text{Heading}(-\frac{2\pi}{9} \sim \frac{2\pi}{9})(\text{rad/step}) & , \text{ if } SA(k) > 40\text{cm} \end{cases} \quad (2.12)$$

2.3 실험 결과

실험 영상 중 일부분이 그림 2-1과 2-2에 소개되고 있다. 영상을 통하여 문을 찾는 과정에서 Positive 영상 20개와 Negative 영상 40개를 연구실 내부에서 위치를 옮겨가며 실험로봇(Pioneer2)에 장착되어있는 CCD카메라를 통하여 획득 하였으며 초음파 센서의 최대거리를 실험환경을 고려하여 3m로 제한하였다. 그리고 초음파 데이터를 퍼지제어기의 입력으로 사용하기 전 데이터의 신빙성을 높이기 위해 각 초음파 센서마다 한번에 10개의 데이터를 평균하여 퍼지 제어기의 입력으로 사용하였으며 송수신 속도는 25hz/sec이다. 실험에 사용한 자율이동로봇의 폭은 50cm 이며 문의 폭은 80cm이다. 로봇이 그림 2-7처럼 A, B, C 위치에서 제자리에서 360° 회전할 때 문의 위치를 잘 찾을 수 있는지에 대한 실험결과가 표3과 표4에 나타나있으며 로봇의 이동경로를 나타내는 실험결과가 그림 2-7에 나타나있다.

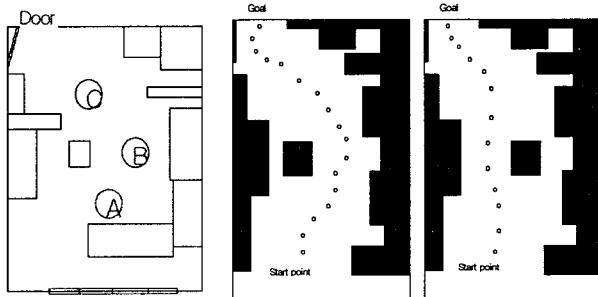


그림 2-7 자율이동로봇의 실험 위치와 이동경로
Fig. 2-7 Simulation result of experiments

비교실험[4] 결과에서 보듯이 제안한 방법을 사용하여 문을 찾을 경우 성공률이 매우 높으며 실패율도 전혀 없는 것을 알 수 있다. 본 실험에서는 Positive 영상 20개와 Negative 영상 40개의 기본영상을 사용했지만 기본영상 획득을 잘하게 되면 조금 더 높은 성공률을 얻을 수가 있다.

표 3 문이라고 올바르게 인식한 경우

Table 3 Accuracy for door recognition in the case of a door

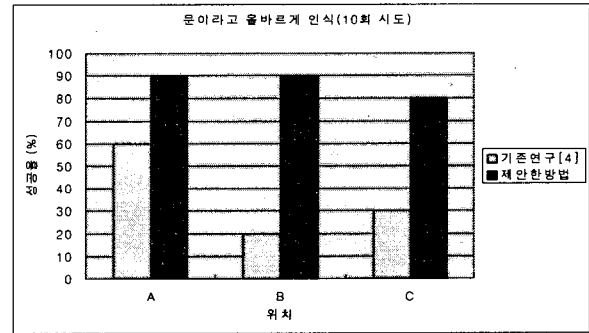
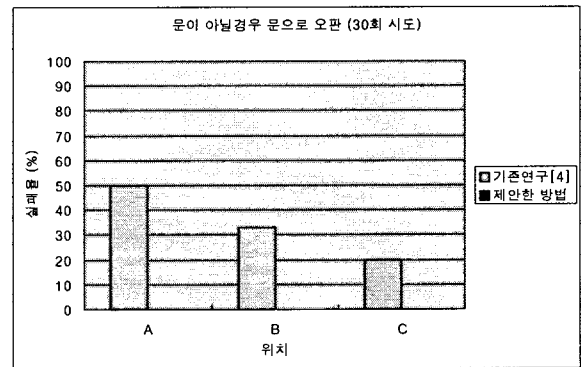


표 4 문이 아닐 경우 문이라고 오판

Table 4 Inaccuracy for door recognition in the case of off door



3. 결 론

자율이동로봇이 주행함에 있어서 문은 로봇에게 큰 제약 조건 이므로 로봇의 주행 성능을 향상시키기 위해서는 이러한 문제점을 쉽게 극복할 수 있어야한다. 이러한 문제점을 개선하기 위해서 본 논문은 PCA 알고리즘에 의한 문 인식 방법을 제안하였다.

실험결과에서 보여주듯이 영상 데이터에 수직라인이 많이 존재하면 수직라인을 이용하는 기존연구방법[4] 을 사용해서는 수직 라인으로 문을 찾을 수 없다. 또한, 최근에는 건물의 디자인이 다양화되는 추세이기 때문에 문이 반드시 수직 라인으로 구성되게, 다시 말하면 문이 직사각형 모양이라 한정지을 수 없는 경우도 존재한다. 이러한 측면에서 볼 때 본 논문이 제안한 방법은 로봇이 문을 찾는데 있어서 상당히 강력한 방법이란 것을 비교실험 결과에서 확인 할 수 있다. 하지만 성능이 우수한 만큼 기본영상을 수집하여 알고리즘을 구현해야 한다는 특성 때문에 여기에 대한 비용이 비교실험을 시도한 기존연구[4]에 비해 많이 소요되는 것은 사실이다. 그러나 만약 동일건물 내부의 모든 문 모양과 문

주변 환경이 비슷하면 비슷한 환경의 영상 수만큼 얻어야 하는 기본영상 데이터가 줄어들기 때문에 적은 양의 기본영상 데이터로 좋은 성능을 낼 수 있다. 그리고 제안한 방법이 실제 공존형 로봇에게 아주 유용하게 사용될 수가 있으며 로봇을 이용한 영상처리, 특히 패턴인식 분야에 응용이 가능하리라고 생각된다.

향후 로봇이 불확실한 환경에서 정확히 문의 위치를 찾고 안전하게 통과하는 행동의 성능을 향상시키기 위해서는 본 논문이 제안한 방법에서 로봇이 실시간으로 새로운 기본데이터 획득 시 기존 데이터와 어떻게 서로 결합시킬 것인가에 대한 알고리즘 연구가 진행 되어야 할 것이다.

참 고 문 헌

[1] "월간 기계기술," pp. 108-119, Jan, 2003.

[2] S. Hutchinson, G. D. Hager, and P. I. Corke, "A Tutorial on Visual Servoing Control," IEEE Trans. on Robotics and Automation, Vol. 12, No. 5, pp. 651-670, Oct, 1996.

[3] N. Kubota, H. Masuta, and F. KOJIMA, "Perceptual System and Action System of A Mobile Robot with Structured Intelligence," IEEE Int. Conf. on Fuzzy Systems, Vol. 2, pp. 12-17, May, 2002.

[4] I. Monasterio, E. Lazkano, and I. Rano, "Learning to Traverse Doors Using Visual Information," IMACS, Vol. 2, pp. 347-356, 2002.

[5] C. Eberst, M. Andersson, and H. I. Christensen, "Vision-Based Door-Traversal for Autonomous Mobile Robots," IEEE Int. Conf. on Intelligent Robots and System, Vol. 1, pp. 620-625, Nov, 2000.

[6] P. Amir, "Door Identification," <http://www-formal.stanford.edu/eyal/cs224b/report.html>, 1999.

[7] S. A. Stoeter, F. L. Mauff, and N. P. Papanikolopoulos, "Real-Time Door Detection in Cluttered Environments," IEEE Int. Conf. on Intelligent Control, pp. 187-192, July, 2000.

[8] S. J. Lee, S. B. Jung, and J. W. Kwon, "Face Detection and Recognition Using PCA," IEEE Reg. Conf. on TENCON 99, Vol. 1, pp. 84-87, Sept, 1999.

[9] H. M. Eibakry, M. A. Aboelsoud, and M. S. Kamel, "Integrating Fourier Descriptors and PCA with Neural Networks for Face Recognition," NRSC Conf. on 17th NRSC., pp. c22/1-c22/8, Feb, 2000.

[10] J. H. Kim, M. W. Seo, and Y. J. Kim, "Obstacle Recognition Method of Mobile Robot Using An Ultrasonic and Vision Sensor," KIEE Conf. on Robotics and Automation, pp. 2444-2446, July, 2003.

저 자 소 개



서민욱 (徐民旭)

1977년 11월 24일생. 2003년 대구대 제어계측공학과 졸업. 2005년 고려대 전기공학과 졸업(석사). 2005~현재 현대자동차 연구원.

E-mail : slhanul@korea.ac.kr



김영중 (金瑛中)

1973년 3월 14일생. 1999년 고려대 전기공학과 졸업. 2001년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2001~현재 동 대학원 박사과정.

E-mail : kyjoong@elec.korea.ac.kr



임묘택 (林畝澤)

1963년 3월 26일생. 1985년 고려대 전기공학과 졸업. 1987년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1990년 미국 Rutgers Univ. 졸업(석사). 1994년 Rutgers Univ. 졸업(박사). 1994년 7월~1995년 2월 삼성종합기술원 Mechatronics 연구실 선임 연구원. 1995년 3월~1996년 8월 창원대학교 제어계측공학과 전임강사. 1996년 9월~현재 고려대학교 전기전자전파공학부 정교수.

E-mail : mlim@korea.ac.kr