

# 시각을 이용한 이동 로봇의 강건한 경로선 추종 주행

손민혁 · 도용태<sup>+</sup>

## Vision-Based Mobile Robot Navigation by Robust Path Line Tracking

Minhyuk Son and Yongtae Do<sup>+</sup>

### Abstract

Line tracking is a well defined method of mobile robot navigation. It is simple in concept, technically easy to implement, and already employed in many industrial sites. Among several different line tracking methods, magnetic sensing is widely used in practice. In comparison, vision-based tracking is less popular due mainly to its sensitivity to surrounding conditions such as brightness and floor characteristics although vision is the most powerful robotic sensing capability. In this paper, a vision-based robust path line detection technique is proposed for the navigation of a mobile robot assuming uncontrollable surrounding conditions. The technique proposed has four processing steps; color space transformation, pixel-level line sensing, block-level line sensing, and robot navigation control. This technique effectively uses hue and saturation color values in the line sensing so to be insensitive to the brightness variation. Line finding in block-level makes not only the technique immune from the error of line pixel detection but also the robot control easy. The proposed technique was tested with a real mobile robot and proved its effectiveness.

**Keywords :** Vision sensing, Line tracking, Mobile robot navigation, Color image segmentation.

### 1. 서 론

근래에 와서 로봇의 이동성이 중요하게 인식되고 있으며, 이와 관련하여 다양한 센서의 사용에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다. 가장 주목 받는 방법은 자연적인 주변 지물을 사람과 같이 시각을 사용하여 인식하고 이를 기준으로 이동하는 것이지만[1], 이러한 작업에 아직 난제가 많이 존재하기 때문에 인식이 비교적 용이한 인공적인 표식을 경로상의 적당한 위치에 부착하고 이를 인식하며 주행하는 방법이 대안이 되고 있다[2]. 그러나 표식을 시각 센서로 인식하며 주행하는 방법은 대체로 큰 계산비용을 필요로 하며, 경우에 따라 인식이 실패할 경우 로봇의 오작동이 초래될 수 있으므로 아직 실제 산업현장에서는 널리 사용되지 못하고 있다.

산업 현장에서 AGV(Automated Guided Vehicles)를 포함한 이동 로봇이 가장 많이 채용하고 있는 주행 방식은 바닥에 설치된 경로선(path line)을 추종하는 방식이다. 이 방식은 주행 오류의 가능성이 아주 낮으므로 신뢰성이 높을 뿐 아니라, 경로선의 검출을 위한 센서 신호의 처리도 간단하여 계산비용도 낮다는 장점이 있다.

이동 로봇의 주행을 위한 바닥 경로선 검출의 기존 센서 활용 방식은 크게 세 가지로 나눌 수 있다. 즉, 자기력 센서를 사용하는 방법[3, 4]과 적외선 센서에 의한 방법[5, 6], 시각 센서를 활용하는 방법[7-11]이 그것들이다. 이들 중 가장 설치 및 계산 비용이 낮은 것은 적외선 센서를 사용하여 경로선과 배경의 명암차를 탐지하는 방법이다. 그러나 기본적으로 광에 의한 방식은 주변 밝기 변화에 민감하기 때문에 이를 균일하게 유지하지 못하면 검출에 실패하는 경우가 발생할 수 있고, 기름 등 바닥 위 이물질에 기인한 오감지의 위험이 있어, 실제 산업현장에서는 자기력 센서를 사용하여 바닥에 설치된 금속이나 자석을 검출하는 방식이 널리 사용된다. 하지만 경로선을 바닥에 매설하거나 고정적으로 부착하기 때문에 상대적으로 설치 비용이 높고, 일단 설정된 경로를 변경하기도 어렵다. 자석 표식을 로봇 이동 경로 상에 이산적으로 설치한 후 로봇이 이를 인식하며 주행하는 방법[12]은 연속된 경로에 의한 방법이 지니는 단점들을 상당히 해소할 수 있으나, 로봇의 이동 제어나 센서 정보 처리의 문제는 보다 복잡해진다. 시각 센서의 출력 영상에서 경로선을 검출하는 방식은 카메라를 비롯한 장치의 비용과 영상 데이터의 처리에 따른 계산 비용이 높고, 적외선 센서의 경우와 마찬가지로 주변광의 변화와 바닥 상태에 민감한 문제가 있어 실제 활용도는 낮다. 그러나 최근 전자 및 반도체 공학의 급속한 발전에 따라 사용이 간편한 저가의 카메라들을 시중에서 쉽게 구할 수 있으므로 장치 비용과 관련된 문제는 상당히 해소되었다. 더욱이 시각 센서는 여타의 센서들에 비하여 풍부한 정보를 제공

대구대학교 전자공학부(School of Electronic Engineering, Daegu University)

<sup>+</sup>Corresponding author : ytdo@daegu.ac.kr

(Received : Jan. 19, 2011, Revised : Mar. 23, 2011, Accepted : Mar. 25, 2011)

하기 때문에 경로상의 장애물을 감지한다든지, 작업 공간에서의 화재나 침입자와 같은 위험요소를 인지하는 등 여타의 활용 가능성이 큰 장점이 있다. 또한 경로선도 테이프나 페인트 등으로 쉽게 설치 가능하고 이의 변경도 간편한 장점이 있다. 다만 주변 환경에 대한 민감성과 계산 비용을 낮추는 문제는 여전히 풀어야 할 과제로 남아 있다. 한편, 시각을 비롯한 다수의 센서로부터 얻어지는 잉여의 정보를 융합하는 방식은 계측의 불확실성을 감소시킬 수 있다는 점에서 장점이 있어 차츰 이동 로봇의 주행에 사용되고 있다 [13]. 그러나 장치의 설치와 데이터 처리에 따른 계산상의 비용이 높고, 본 논문의 주제인 경로선의 검출에는 거의 사용되지 않고 있다.

본 논문에서는 카메라를 이동 로봇의 시각 센서로 사용하여 바닥 경로선을 검출하는 기법을 다룬다. 이 주제는 오래 전부터 연구가 수행된 바 있어 새로울 것이 없으나, 실제 활용에 있어서는 전술한 바와 같은 여러 문제점들이 있기 때문에, 이를 극복할 수 있는 새로운 방안을 제시하는 것에 본 논문의 주안점이 있다. 즉, 다양하고 가변적인 환경에서도 신뢰할 수 있는 시각 기반 경로선 검출 방법과 이에 기반한 이동 로봇 주행 방법을 고안하는 것이 연구의 목표이다.

본 논문은 다음과 같은 방식으로 서술되었다. 먼저 2장에서 기존의 주요한 시각 기반 로봇 경로선 검출 기법들을 검토하고 이들의 장단점에 대해 분석한 후, 3장에서 기존 기법들의 문제점을 극복할 수 있는 새로운 방법을 제안한다. 그리고 4장과 5장에서 실험의 결과와 연구의 결론을 각각 제시한다.

## 2. 이동 로봇의 경로선 검출을 위한 시각 기법

경로선을 바닥에 설치하고 로봇이 시각을 사용하여 이를 추종하며 주행하는 방식은 개념적으로 간단하고 기술적 실현도 쉽기 때문에 오래 전부터 연구가 이루어져 왔다. 예를 들어 Ishikawa 등[7]은 일찍이 흑백 TV 카메라를 사용하여 검은색 바닥에 그려진 흰색 경로선을 인식하는 방법을 연구하였다. 영상에서 수직으로 위치하는 경로선을 가정하고, 이와 법선 방향으로 영상을 스캔하며 화소의 명암값(gray level)이 급격히 높아지는 양의 경계(edge)와 반대로 급격히 낮아지는 음의 경계를 탐색함으로써 주행 경로선을 검출하였다. 경계 검출에서 중요한 임계치는 주행 전에 미리 지정하였는데, 밝기 히스토그램에서 두 번째 첨두치의 2/3 위치에서 고정하였다. 이는 사용된 주행 환경의 특성을 고려하여 결정된 것이다. 한 장의 256×256 해상도 영상을 처리하는데 300 ms의 시간이 소비되었지만, 현재의 컴퓨터로는 훨씬 빠른 처리가 가능할 것이다. 그러나 Ishikawa의 방식은 검은색 배경에 흰색 선을 처리할 때만 유용한 제약이 있고, 공공기관의 바닥에서 흔히 볼 수 있는 모자이크 대리석 문양이나 타일 등이 있는 경우에는 적용할 수 없다. 또한 주변 광의 시간적 변화에 강인하지 못한 문제가 있

고, 특히 경로선 상에 그림자가 존재할 때와 같은 부분적인 광 특성을 제대로 처리하지 못하는 단점이 있다. 그리고 경계 검출의 과정에서 필연적으로 크고 작은 잡음이 발생하는 문제도 있어 현장 활용에는 어려움이 있다.

경계 검출에 의한 경로선 검출 방식의 제 문제들을 해결하기 위해, Schuster와 Katsaggelos는 선 모형(model)을 사용한 가중 최소 평균제곱오차법(weighted minimum MSE)을 제안한 바 있다 [8]. 영상 좌표  $(r, c)$ 를 지나는 임의의 선을 다항식  $c = x_1 r^N + x_2 r^{N-1} + \dots + x_{N-1} r + x_N$ 으로 표현하였는데, 여기서  $x_i$ ,  $i=1, 2, \dots, N$ ,는 계수이고  $N$ 은 다항식의 차수이다. 다항식의 모형이 사용되었으므로 탐색되는 경로선은 굳이 직선일 필요가 없다. 영상 내 모든 화소들로부터 제곱오차를 최소화하는 방식으로 주어진 선의 식을 결정하였다. 단, 흑백 영상 내 흰색 선을 가정하고 밝은 화소에 높은 가중치를 주었고, 또 화소값의 기울기(gradient) 크기에 비례하여 가중치를 주었으며, 로봇에 장착된 카메라와 가까이 있는 화소에 큰 가중치를 주었다. 이 방식은 경계 검출시와 같이 영상 밝기의 기울기를 구하지만 따로 임계치를 지정하지 않으므로 상당한 잡음이 존재하는 영상에서도 효과적으로 경로선의 검출이 가능하였다. 그러나 영상 내 다른 특성을 가지는 경로선이 복수로 존재하는 경우, MSE의 적용으로는 좋은 결과를 도출하기 어렵다. 이러한 경우는 로봇이 방향을 전환하거나 정지하게 되는 지점 부근, 즉 우회전(↻), 좌회전(↶), 혹은 멈춤(⊘) 형태의 경로선을 만날 때 발생할 수 있다. 이 기법의 또 다른 제약은 흑백 영상에 기반한 방법이라는 점이다. 흑백 영상에 의한 경로선의 탐색은 영상 내 비슷한 밝기를 가지는 바닥의 점들과 같은 잡음 요인에 의하여 오류를 유발할 가능성이 크다[9].

Ismail 등[10]은 저가의 USB용 웹 카메라 출력 영상을 MATLAB으로 처리하고, LABVIEW를 사용하여 이동 로봇을 제어하는 간편한 시스템의 구성하였다. 카메라의 컬러 출력 영상을 흑백 영상으로 변환하여 사용하였는데, 이는 카메라로부터 제공되는 정보를 충분히 사용하지 않게 되는 것이며, 따라서 기존의 흑백 영상 기반 기법들에서와 같이 어두운 배경과 백색 경로선의 사용과 같은 제약조건을 여전히 필요로 하는 문제가 발생하였다.

컬러 영상에 기반한 경로선 검출 방법으로, Ding 등[11]은 카메라의 [R(red), G(green), B(blue)] 컬러 공간에서의 영상을 [H(hue), S(saturation), I(intensity)] 컬러 공간으로 변환한 후 경로선을 검출하였다. 일단 경로선의 시작점과 종결점의 위치를 얻고 이로부터 경로 정보를 결정하였는데, 이는 경로선의 경계를 검출하는 방식인 Ishikawa의 기법[7]과 원천적으로 동일한 접근법으로, 경계 검출에 기반한 기법들이 가지고 있는 문제점들[8]을 대체로 가지게 된다.

### 3. 강건한 시각기반 경로선 추종 주행

이동 로봇에 장착된 컬러 카메라 출력영상을 처리하여, 로봇이 주변 환경 변화에 강건하게 미리 지정된 경로선을 추종하며 주행하는 시스템을 구현하였다. 먼저 관심의 대상이 되는 영상 영역(ROI: Region Of Interest)을 설정한 후, 크게 4단계의 절차를 거쳤는데, 구체적으로는 컬러 공간 변환, 화소 단위 경로선 검출, 블록 단위 경로선 검출, 그리고 로봇의 주행 제어이다. Fig. 1은 본 논문에서 제안하는 기법의 주요한 절차를 요약하여 보여 준다.

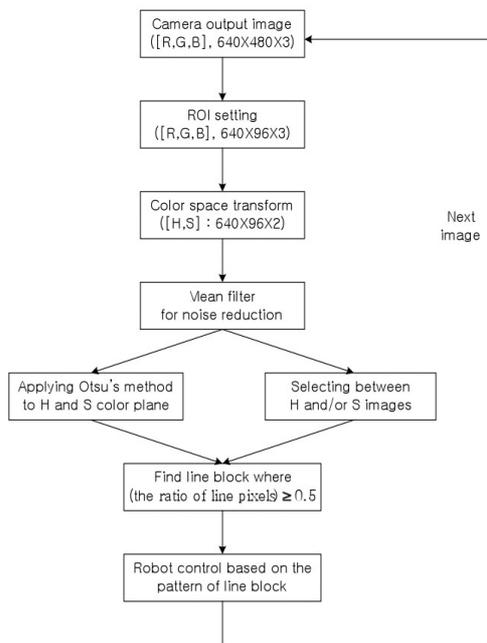


Fig. 1. Steps of vision-based path line tracking technique proposed for robot navigation.

#### 3.1 컬러 공간 변환

대부분의 컬러 카메라는 영상을 [R,G,B] 형식으로 출력한다. 즉, 세 개의 다른 광 스펙트럼에 대해 각각의 모노크롬(monochrome) 영상을 독립적으로 출력하는 것으로, 화소당 1 바이트(byte)의 크기로  $N \times M$ 개의 화소 해상도를 가지는 영상의 경우, 총  $N \times M \times 3$  바이트의 저장 공간이 필요하다. 이 때 각 스펙트럼 별 영상은 모두 주변 밝기에 의존적이다. 이와 같은 형식의 컬러 영상으로부터 명도(I)와 색도(H), 그리고 채도(S) 정보를 아래의 식을 사용하여 구할 수 있다[11].

$$I = \frac{R + G + B}{3} \tag{1.a}$$

$$H = \theta \text{ if } B \leq G, \text{ or } 360^\circ - \theta \text{ if } B > G \tag{1.b}$$

단,  $\theta = \cos^{-1} \frac{[(R-G) + (R-B)]/2}{[(R-G)^2 + (R-B)(G-B)]^{1/2}}$

$$S = 1 - \frac{3}{R + G + B} [\min(R, G, B)] \tag{1.c}$$

[R,G,B] 공간의 컬러값이 [H,S,I] 공간으로 변환되면 명도가 색채로부터 분리된다. 즉, 주변 밝기만 변화하고 실제 대상은 변화하지 않을 때, H와 S값은 거의 고정되고 I값만 변화하게 된다. 따라서 I값을 무시함으로써 주변 밝기 변화에 둔감한 결과를 얻을 수 있으며, 처리할 데이터의 양도 1/3만큼 줄어들게 된다.

#### 3.2 화소 단위 경로선 검출

본 논문에서는 Ding 등[11]의 기법에서와 같이 카메라에서 출력되는 [R,G,B] 컬러 영상을 [H,S,I]로 변경한 후, H와 S값에 의해서만 경로선을 검출한다. 다만 Ding의 기법에서와 같이 경로선의 경계를 검출하여 이용하면 경계 검출시의 오류에 따른 문제점[8]을 피할 수 없으므로, 영상에서 경로선의 색채값에 해당하는 화소들을 배경으로부터 분리하여 이용한다. 본 논문에서는 이를 위하여 두 가지 방법을 사용하였는데, 그 첫 번째 방법은 Otsu[14]의 영역 분리법을 활용하는 것이며, 두 번째는 H와 S영상을 선택적으로 이용하는 방법이다.

첫 번째로, 경로선에 해당하는 화소들을 Otsu의 기법을 적용하여 분리하였다. Otsu는 흑백 영상에서 화소들의 밝기값 분포에 기반하여 자동으로 영상 내 전경과 배경을 이진으로 구분하는 방법을 일찍이 제안한 바 있고[14], 이 기법은 주어진 화소 분포 특성에서 확률적으로 최적의 분리가 가능하게 하므로 현재까지도 널리 사용되고 있다. 우리는 H-S색채 평면 상의 화소 분포를 얻고, Otsu의 기법을 활용하여 영상 내 영역을 분리하였다. Fig. 2는 이와 같은 과정을 적용한 예를 보여 주는데, (a)의 영상으로부터 (b)와 같은 H-S 색채 평면 분포를 얻고, 여기에 Otsu의 방법을 활용하여 (c)와 같은 이진 영상을 검출하였다.

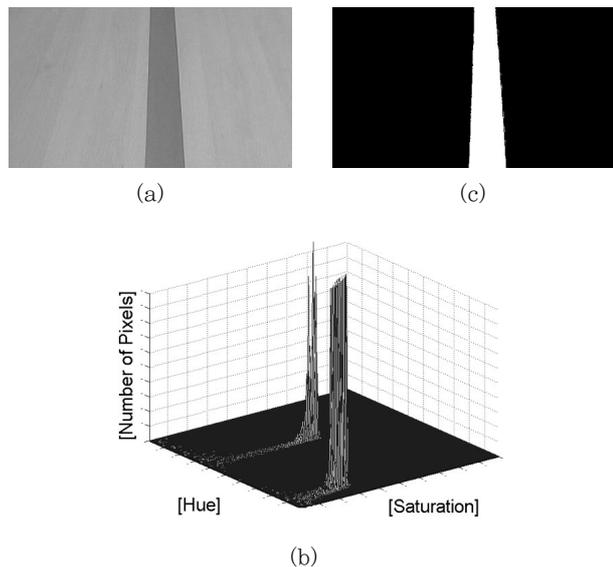


Fig. 2. Line pixel detection by Otsu's automatic segmentation method: (a) Original image, (b) Histogram on H-S color plane, (c) Segmentation result.

Otsu의 기법은 화소 분포에 따른 자동화된 기법으로, 배경과 경로선의 색채에 대한 별도의 정보가 없더라도 적용할 수 있다. 즉, H-S 색채 평면에서 다수의 화소가 구성하는 분포가 배경이며, 소수의 화소들이 밀집된 분포가 경로선이 된다. 그리고 영역 구분은 이들 두 분포를 최적으로 가를 수 있는 곳에서 결정된다. 이 방법은 필요에 따라 여러 가지 색채의 경로선이 사용되는 경우에 유용할 수 있다. 예를 들어 다른 특성의 바닥을 가지는 방과 복도에서 각각 다른 색채의 경로선을 사용하는 경우가 그러하다.

경로선에 해당하는 화소들을 검출하기 위한 두 번째 방법으로 H와 S영상을 선택적으로 사용하였다. 이 방법은 대부분의 경우 바닥이나 경로선의 색채 정보가 기지라는 사실에서 출발한다. 즉, 로봇이 주행해 나가야 할 공간들에 설치된 바닥과 경로선의 표본으로부터 확률적 분포 특성을 얻고, 이를 이용하여 적절한 경로선 화소 추출의 방법을 적용하는 것이다. 두 번째 방법은 Otsu의 영역 분리법을 적용할 때 좋지 못한 결과를 얻게 되는 경우, 즉 H와 S 중 어떤 영상에서 배경과 경로선이 제대로 분리되지 않는 경우에도 유효할 수 있다. Fig. 3은 그러한 예를 보여 준다. 그림에서 (a) 영상을 H와 S영상으로 변환한 후, H-S 색채 평면에서의 분포를 얻어 보면 (b)와 같이 배경과 경로선의 구분이 쉽지 않은데, 이는 H의 분포가 (c)에서 보인 바와 같기 때문이다. 이에 비해 S의 분포는 (d)에서 볼 수 있듯이 효과적으로 배경과 경로선을 구분하고 있으므로, 이 때는 H와 S를 모두 사용하는 것 보다 S 영상만을 선택적으로 사용하여 영상 내 영역을 구분하는 것이 효과적이다.

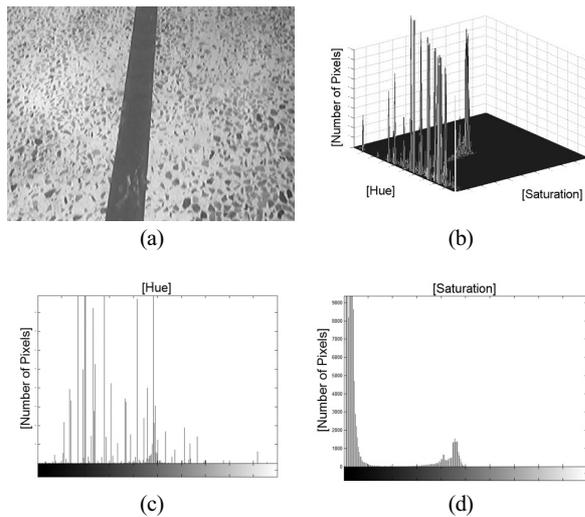


Fig. 3. Example when Otsu's method fails: (a) Original image, (b) Histogram on the H-S color plane, (c) Histogram of H values, (d) Histogram of S values.

이동 로봇이 적용될 장소의 표본 영상으로부터 배경과 경로선의 H와 S 분포가 알려지면, 경로선의 검출을 위해 두 영역을 잘 구분할 수 있는 분포의 영상을 선택적으로 이용할 수 있다. 이를 위해 H와 S의 분포로부터 다음 네 가지의 경우를 가정한다.

- (i) H와 S 분포 모두에서 배경과 경로선이 잘 구분되는 경우,

- (ii) H 분포에서만 배경과 경로선이 잘 구분되는 경우,
- (iii) S 분포에서만 배경과 경로선이 잘 구분되는 경우,
- (iv) H와 S 분포 모두에서 배경과 경로선이 잘 구분되지 않는 경우.

H와 S의 모노크롬 영상에서 배경과 경로선에 속하는 화소들이 정규 분포를 따른다고 가정할 때, 그 확률적 특성이 H 영상에서의 배경의 경우  $(\mu_{HB}, \sigma_{HB})$ 에 의하며, 경로선의 경우  $(\mu_{HL}, \sigma_{HL})$ 에 의하고 하자. 또, S 영상에서의 배경은  $(\mu_{SB}, \sigma_{SB})$ , 경로선은  $(\mu_{SL}, \sigma_{SL})$ 에 의한다고 하면, 위 (i)~(iv)의 네 가지 경우에 대한 실제적인 구분은 다음 Eq.(2)의 각 조건에 의하여 결정될 수 있다. 단, 식에서  $\sim$ 는 논리적 부정을,  $\vee$ 과  $\wedge$ 은 논리합과 논리곱을 의미한다.

$$((\mu_{HB} + 2\sigma_{HB} < \mu_{HL} - 2\sigma_{HL}) \vee (\mu_{HL} + 2\sigma_{HL} < \mu_{HB} - 2\sigma_{HB})) \quad (2.a)$$

$$\wedge ((\mu_{SB} + 2\sigma_{SB} < \mu_{SL} - 2\sigma_{SL}) \vee (\mu_{SL} + 2\sigma_{SL} < \mu_{SB} - 2\sigma_{SB})) \quad (2.b)$$

$$\sim Eq.(2.a) \wedge ((\mu_{HB} + 2\sigma_{HB} < \mu_{HL} - 2\sigma_{HL}) \vee (\mu_{HL} + 2\sigma_{HL} < \mu_{HB} - 2\sigma_{HB})) \quad (2.c)$$

$$\wedge ((\mu_{SB} + 2\sigma_{SB} < \mu_{SL} - 2\sigma_{SL}) \vee (\mu_{SL} + 2\sigma_{SL} < \mu_{SB} - 2\sigma_{SB})) \quad (2.d)$$

$$\sim (Eq.(2.a) \vee Eq.(2.b) \vee Eq.(2.c))$$

일단 사용된 배경과 경로선의 확률적 분포 특성이 위 네 가지 경우 중 어떤 경우에 속하는지가 결정되면, 영상의 선택 및 배경과 경로선 구분을 위한 임계치는 식 (2)의 각 조건에 대하여 각각 다음과 같이 결정될 수 있다.

- (a) H 영상에서  $((\mu_{HB} + 2\sigma_{HB}) + (\mu_{HL} - 2\sigma_{HL})) / 2$  if  $\mu_{HB} < \mu_{HL}$ ,  $((\mu_{HL} + 2\sigma_{HL}) + (\mu_{HB} - 2\sigma_{HB})) / 2$  otherwise.
- S 영상에서,  $((\mu_{SB} + 2\sigma_{SB}) + (\mu_{SL} - 2\sigma_{SL})) / 2$  if  $\mu_{SB} < \mu_{SL}$ ,  $((\mu_{SL} + 2\sigma_{SL}) + (\mu_{SB} - 2\sigma_{SB})) / 2$  otherwise.
- (b) H 영상만 선택하여 사용하고 (a)과 동일한 임계치.
- (c) S 영상만 선택하여 사용하고 (a)과 동일한 임계치.
- (d) H 영상만 선택하여 사용하고 임계치는  $(\mu_{HB} + \mu_{HL}) / 2$  if  $|\mu_{HB} - \mu_{HL}| > |\mu_{SB} - \mu_{SL}|$ . Otherwise, S 영상만 선택하고 임계치는  $(\mu_{SB} + \mu_{SL}) / 2$ .

### 3.3 블록 단위 경로선 검출

일단 색채값을 기준으로 경로선에 해당하는 것으로 추정되는 화소들을 앞 절의 방법과 같이 추출하였으면, 그 결과를 이용하여 최종적으로 작은 영상 블록(block) 단위로 경로선을 결정하였다. 우선 영상에서 필요한 부분만 ROI로 선정하여 처리하였는데, 이는 Fig. 4의 예를 통하여 보인 바와 같다. 영상의 아래쪽, 즉 카메라가 탑재된 로봇과 가까운 쪽에 20개의 블록을 상하 2개의 띠 모양으로 지정하였다. 이와 같이 영상 내 일부만 처리하면 계산량을 크게 줄일 수 있다. Fig. 4의 영상에서 블록이 차지하는 면적은 전체 영상 면적의 약 1/5에 불과하다.

블록 단위로 경로선을 검출할 때 얻을 수 있는 다른 이점은 화소단위 검출의 오류에 대한 내인성도 증대된다는 점이다. 화소 단

위로 경로선을 검출할 경우, 경로선이나 배경 영역에서 오분류된 화소들이 일부 존재하기 마련이다. 우리는 각 블록 별로 1/2 이상의 화소가 경로선의 화소로 판정되었을 때 해당 블록을 경로선 영역으로 분류하였는데, 이를 통하여 결국 어느 정도의 화소 검출 오류는 영역 판정에 영향을 미치지 않게 된다. 이 때 판정의 기준을 1/2로 설정한 것은 만약 두 인접한 소영역의 가운데에 경로선이 수직으로 위치하는 경우, 그 두 영역들 중 하나의 영역만 경로선으로 검출되도록 하기 위한 것이다. 예를 들어 Fig. 4의 경우에는, 경로선이 영상의 좌측에서 두 번째 블록들과 세 번째 블록들에 걸쳐 있으나, 두 번째 블록들에서 1/2이상 면적을 차지하고 세 번째 블록들에서는 그 이하의 면적을 차지하므로, 두 번째 블록들이 경로선에 해당하는 것으로 판정되었다.

블록 단위의 경로선 결정이 가지는 단점은 정확도의 감소이다. 즉, 블록 별로 양자화할 때, 이에 따른 오차는 필연적이다. 만약 경로선의 실제 너비를  $W$ 라 하고,  $W$ 가 영상 내에서 본 논문에서와 같이 하나의 블록의 너비에 해당하도록 카메라가 설정되었다고 하면, Fig. 5(a)와 같이 실제 경로선과 블록이 완벽히 일치할 때 양자화 오차는 0으로 최소가 될 것이며, 최대 오차는 (b)에 보인 바와 같이  $W/2$ 로 이는 블록에서 경로선이 차지하는 면적이 1/2이 될 때 발생한다. 로봇 주행시 위치 오차  $e_{Nav}$ 는 Eq.(3)과 같이 로봇 제어 오차  $e_{Rob}$ 와 센서 계측 오차  $e_{Sen}$  합으로 표시할 수 있고, 블록 기반 검출로 인한 오차가 센서 오차의 대부분을 차지한다고 하면, 이의 기대치는 최대 및 최소치의 평균치인  $E[e_{Sen}] = W/4$ 와 같다. 일반적으로 경로선의 너비가 크기 않음을 고려할 때, 경로선 너비의 1/4정도의 평균 오차는 로봇 주행에 큰 문제가 되지 않으며, 결국 블록 기반의 경로선 검출 방식은 유효하다고 볼 수 있다.

$$e_{Nav} = e_{Rob} + e_{Sen} \tag{3}$$



Fig. 4. Block-level path line detection.

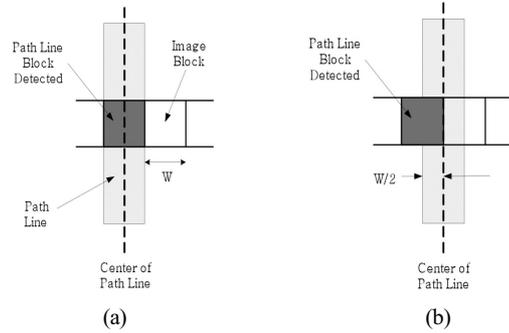


Fig. 5. Error analysis of block-level processing: (a) When the path line perfectly matches a block, (b) When the maximum error occurs.

### 3.4 로봇 주행 제어

시각 센서에 의하여 경로선에 해당하는 부분이 두 개의 띠 모양으로 설정된 영상 내 블록들에서 검출되면, 이를 이용하여 로봇의 주행을 제어하게 된다. 본 논문에서는 Fig. 6에서 보인 바와 같이, 아래쪽 띠와 위쪽 띠에서의 검출된 블록들의 상대적인 위치에 따라 로봇이 직진할지, 혹은 좌 또는 우측 방향으로 이동할 것인지를 결정하였다. Fig. 6(a)는 경로선의 블록이 영상의 좌측에서 검출된 경우로 로봇의 우측 바퀴 모터의 속도를 증대시켜 좌측으로 이동하여야 하며, (b)는 블록이 영상의 중앙에서 검출된 경우로, 로봇은 직선 주행을 하면 된다. 그리고 (c)는 경로선의 블록이 영상의 우측에서 검출된 경우로 로봇의 좌측 모터 속도를 증대시켜야 한다. 그림 (d)는 경로선의 블록이 영상의 우측에서 검출되었으므로, 로봇의 좌측 바퀴 모터의 속도를 증대시켜 일단 로봇을 우측으로 이동하여야 한다. 일정 시간의 이동 후에는 (a)와 같은 영상의 블록 검출이 이루어 질 것이며, 여기서 우측 바퀴 속도를 증가시켜 최종적으로 (b)와 같은 블록을 검출할 수 있다. 그림 (e)는 좌회전이 필요한 경우이며, (f)는 경로선이 끝나 로봇의 정지가 필요한 블록이 검출된 경우이다.

이상의 서술과 같이 검출된 경로선 블록의 위치와 패턴을 사용하면 로봇의 주행제어가 간단해 진다. Fig. 4에서 이미 보인 바와 같이, 두 개의 띠 모양으로 정의된 총 20개의 블록은 아래쪽 띠의 최좌측에 위치한 블록을 1번으로 하여 우측으로 10번까지 번호를 지정하고, 위쪽 띠에서도 최좌측 11번부터 최우측 20번까지 블록 번호를 지정하였다. 이 경우, 동일한 수직선 상에 존재하는 위쪽 블록과 아래 쪽 블록 사이에는 다음 Eq. (4.a)의 관계가 성립한다. 예를 들어, Fig. 6(a)의 경우  $n=3, m=13$ 으로 Eq. (4.a)의 관계를 만족시킨다. 임의의 검출된  $n$ 과  $m$ 이  $4 \leq n \leq 7$ 과  $14 \leq m \leq 17$ 의 범위에 있으면 로봇은 직선 구간에 있다고 가정하고, 그렇지 않은 경우에는 Fig. 6에서 보인 방식과 같이 방향을 조절하게 된다. 이 때 로봇 모터 속도의 증분은 Eq. (4.b)와 같이 결정될 수 있고, 펄스 진폭 변조(PWM : Pulse Width Modulation) 방식으로 모터의 속도를 제어 하였다.

$$m = n + 10 \tag{4.a}$$

$$\Delta\theta = k |m - n - 10| \tag{4.b}$$

단, 식에서  $n$ 은 아래 쪽 띠에서 검출된 경로선 블록의 번호,  $m$ 은 위쪽 띠에서 검출된 경로선 블록의 번호,  $k$ 는 비례 상수,  $\dot{h}$ 는 모터 속도의 증분을 의미한다.

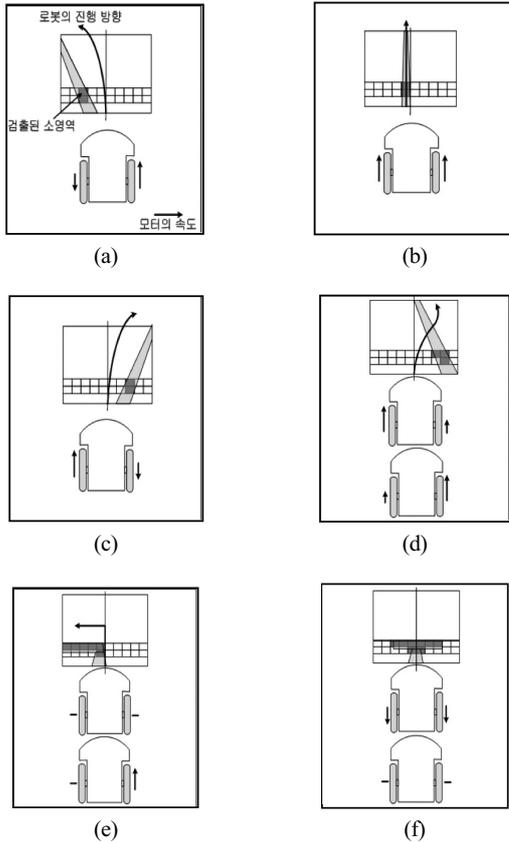


Fig. 6. Robot wheel control based on detected line block patterns.

### 4. 실험

본 논문에서 제안된 방법의 성능을 실제 실험을 통하여 확인하였다. 먼저 다양한 환경에서 영상을 취득한 후, 제안된 방법이 목표한 바와 같이 주변 환경의 영향을 적게 받으며 경로선에 해당하는 화소들을 검출할 수 있는지 확인하였다. 실험을 위해서 Fig. 7과 같이 여러 조건하에서 영상을 취득하였다. Fig. 7(a)~(c)는 동일하게 회색 톤의 배경과 연청색의 경로선을 가지는 영상이지만 주변 밝기가 다르다. 그리고 (d)는 불규칙한 대리석 문양을 가진 바닥을 배경으로 녹색의 경로선 상에 그림자가 부분적으로 존재한다. 즉, (a), (b), (c)는 시간적 변화에 대한 시험 영상이며, (d)는 장소적 변화에 대한 시험 영상이라 할 수 있다. 먼저 기존의 기법들이 주로 사용하는 방법과 같이 명암차를 이용하여 경로선 화소들을 탐색한 결과는 Fig. 8과 같았다. 결과로 얻어진 이진 영상에

서 흰색이 검출된 경로선이며, 검은색이 배경이다. 얻어진 결과에서 알 수 있듯이 흑백 영상에 기반한 기존의 기법은 좋지 못한 성능을 보였다. 이는 주변 광의 변화에 취약한 기법상의 특성과 실험에서 사용된 영상에서 광의 분포가 균질하지 못한 데서 기인한 것으로 보이는데, 이러한 상황은 로봇의 실제 활용 현장에서 흔히 발생할 수 있다.

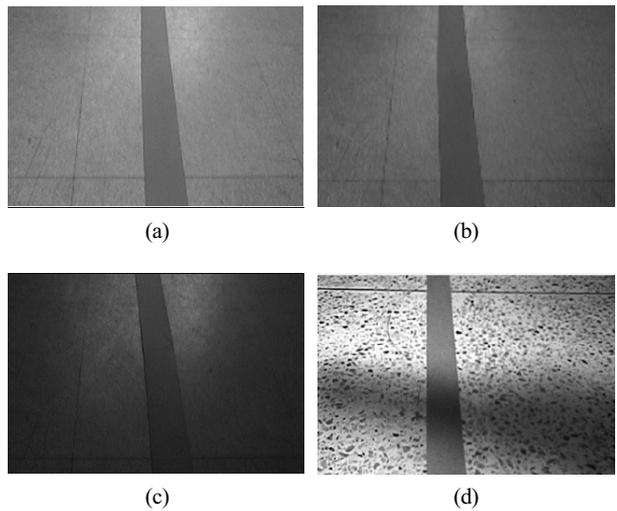


Fig. 7. Experimental path line images acquired in different surrounding conditions.

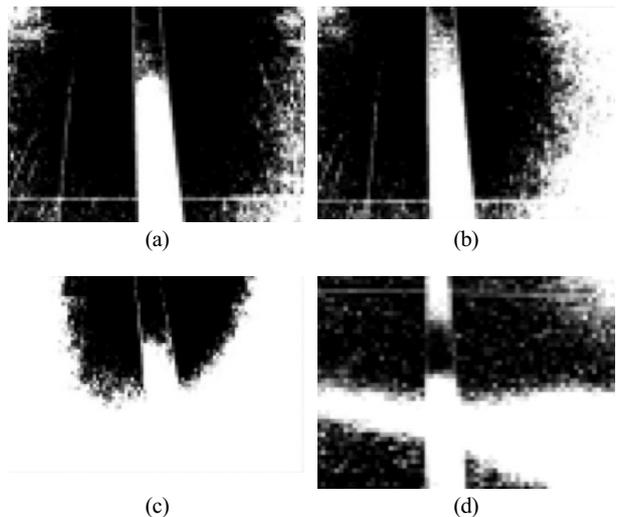


Fig. 8. Intensity-based path line pixel detection results for the experimental images of Fig. 7.

동일한 실험 영상을 본 논문에서 제안한 방식과 같이, H와 S영상으로 변환한 후, Otsu의 자동화된 영역 분리법과 H와 S의 선택적 사용 방법에 의하여 처리한 결과는 각각 Fig. 9 및 Fig. 10과 같았다. 그림에서 볼 수 있듯이 두 방법 공히 제어되지 못한 주변 환경 조건하에서 대체로 강건한 검출 결과를 보였다. 그러나 Fig. 7(d)의 실험 영상에 대해서는 Otsu의 방법을 활용하는 경우보다 H와 S영상을 확률적 분포 특성에 기초하여 선택적으로 사용하는

방법이 더 좋은 결과를 보였으며, 이는 정량적으로 Table 1에 요약한 바와 같다. 표는 배경과 경로선에 대해 각각 200개의 화소를 임의로 선택하여 확인한 결과이다.  $L_T$ 는 실제 경로선에 해당하는 화소가 기법의 적용 결과 경로선으로 바르게 판정된 경우이며,  $L_F$ 는 배경으로 잘못 판정된 경우, 그리고  $B_T$ 는 실제로 배경에 해당하는 화소가 기법의 적용 결과 배경으로 바르게 판정된 경우이며,  $B_F$ 는 경로선의 화소로 잘못 판정된 경우를 의미한다. 총 성능률  $\eta$ 는 Eq. (5)와 같이 정의되었다.

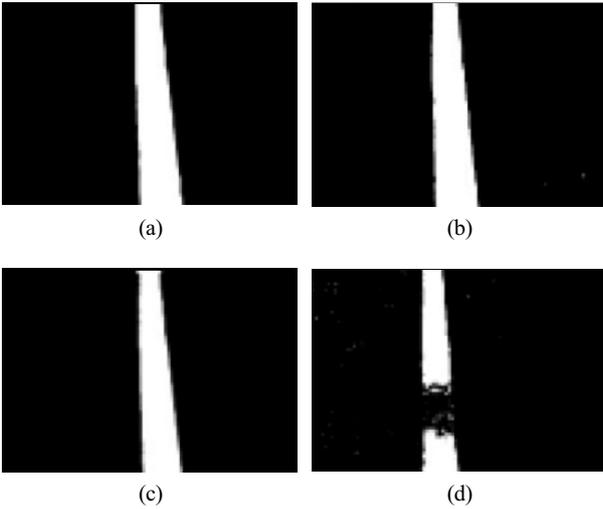


Fig. 9. Results by using Otsu's method to the H-S planes of the experimental images.

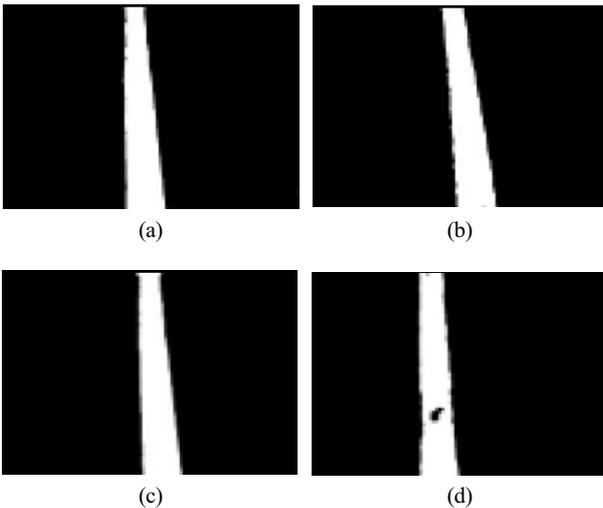


Fig. 10. Results by selecting H and/or S image(s) based on their statistical distributions for the experimental images.

$$\eta = \frac{L_T + B_T}{L_T + L_F + B_T + B_F} \times 100 \quad [\%] \quad (5)$$

Table 1. Quantitative comparison between two path line pixel detection methods for 200 sample pixels

Method Results	Otsu's method on H-S plane	Image selection between H and/or S
$L_T$	137	181
$L_F$	63	19
$B_T$	169	186
$B_F$	31	14
$\bar{h}$	76.5	91.75

한편 기존의 로봇 주행을 위한 경로선 탐색 기법들 중, 본 논문에서와 같이 H와 S색채 정보를 사용하는 Ding등의 방법[11]을 적용하여 경로선의 경계를 검출한 결과는 Fig. 11과 같았다. 단, Ding등은 영상에서 경계를 검출하기 위한 구체적인 알고리즘을 제시하지 않았으므로, 우리는 경계 검출을 위한 방법들 중 현재 널리 사용되고 있고, 성능도 우수한 것으로 알려진 Canny의 다단계 경계 검출법[15]을 적용하였다. 얻어진 결과 영상에서는 경계의 많은 오검출이 확인되었다.

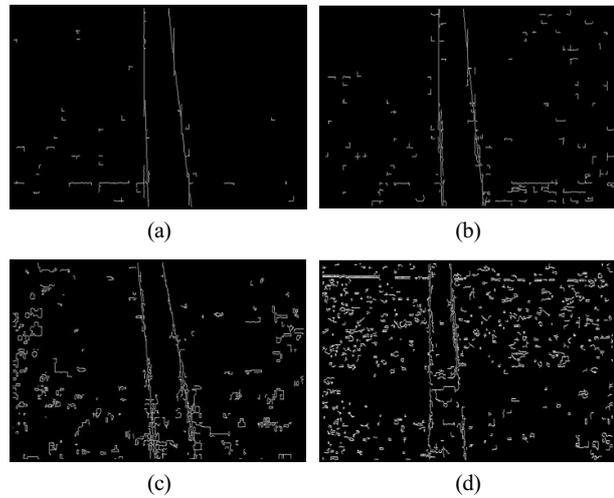


Fig. 11. Results by edge detection using Canny's method after color conversion from [R,G,B] to [H,S].

제안된 방법을 실제 로봇 주행에 적용하여 보았다. Fig. 12와 같이 두 개의 구동 바퀴와 하나의 보조 바퀴를 가진 이동 로봇을 제작하여 실험에 사용하였다. 2.4 GHz의 dual core CPU를 가진 휴대용 PC를 탑재하였고, 로봇의 상부에 장착된 초음파 거리 센서를 사용하여 주행 중 장애물을 감지할 수 있도록 하였다. 경로선 추종 주행 실험을 위해 로봇의 전방에 컬러 카메라를 비스듬하게 하향 설치하였는데, 카메라의 영상 해상도는 640×480 화소였다.

블록 단위로 경로선을 추출하기 위하여, 각 블록을 64×48 화소 배열로 설정하고, 20개의 블록으로 구성된 부분 영상만 처리하였다. 이들 블록을 처리하는데 총 28 msec의 시간이 소요되었는데, 이는 전체 영상을 처리할 때 소요된 시간인 150 msec의 약 1/5에 불과하며, 결과적으로 초당 30 프레임의 실시간 비디오 속도로 처리하는 것이 가능하였다.

로봇이 가로×세로가 160×270 cm인 직사각형 모양의 시험용 경로를 추종하며 자율 주행하도록 하였다. 불규칙한 대리석 무늬가 있는 바닥을 배경으로 녹색의 테이프를 경로선으로 사용하였다. 로봇이 한 바퀴 회전 후 정지하고, 다시 출발하는 방식으로 10회 주행하면서 위치 오차를 측정하고, 또 연속으로 정지 없이 10회 주행하면서 매 번 위치 오차를 측정한 결과, 각각의 경우 평균 오차는 8.7 cm와 8.4 cm로 정지 후 다시 출발하는 경우의 오차가 오히려 조금 더 컸지만, 그 차이가 큰 의미를 가지는 것으로 생각되지는 않는다. 사용된 경로선의 폭은 5 cm이었고, 이는 영상 내 하나의 블록 너비에 해당한다. Eq. (3)을 고려하면, 주행 오차의 대부분은 센서 오차 보다는 로봇 제어 오차, 즉  $e_{Rob}$ 에 의한다는 것을 알 수 있다.

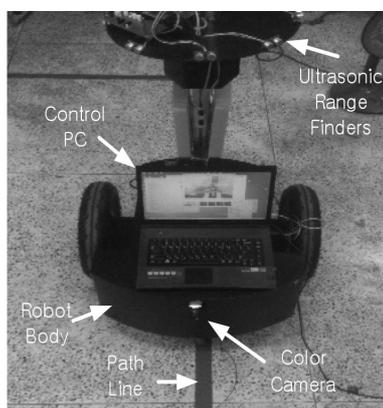


Fig. 12. Mobile robot used for the experiment.

## 5. 결론

이동 로봇이 주변 환경 변화에 둔감하게 경로선 추종 주행을 할 수 있도록 하는 시각 기반 방법이 제안되었다. 카메라 영상 화소들의 H와 S색채 분포에 대해, Otsu의 영역 분리법을 적용하는 방법과 각각의 확률적 특성을 고려하여 선택적으로 영상을 분할하는 방법을 제안하였다. 사용된 두 가지 방법은 실제 영상을 통한 실험에서 환경 변화에 대체로 강건한 경로선 검출 결과를 보였으며, 특히 후자가 더 좋은 결과를 보였다. 화소 단위 검출의 결과는 블록 단위의 경로선 검출에 사용되었으며, 이는 검출 잡음에 대한 내인성을 증대시키면서, 동시에 로봇의 제어를 간편하게 하였다.

본 논문에서 제안한 방법은 크게 두 가지 측면에서 의의를 가진다. 먼저 시각 기반 경로선 주행이 가지는 환경 의존성의 문제를 대체로 극복하였다. 검은 바닥에 흰 주행선과 같이 기존의 시각 기반 기법들이 주로 전제하는 조건을 특별히 필요로 하지 않으며, 주변 밝기나 바닥 면의 변화에 대해서도 강인하다. 둘째로, 제안된 방법은 대부분의 다른 방법에서와는 달리 주어진 시점의 영상에서 임계치가 자동으로 결정된다. 따라서 활용에 있어 모호함이 없고, 그 실행이 간단하다.

## 감사의 글

본 연구는 지식경제부 및 정보통신산업진흥원의 로봇 비전 연구의 한계 상황 돌파를 위한 핵심 기술 개발 지원 사업의 연구결과로 수행되었음(NIPA-2010-C7000-1001-0006).

## REFERENCES

- [1] R. C. Luo, S.-C. Lin, and C. L. Chun, "Indoor autonomous mobile robot localization using natural landmark," *Prof. IEEE Conf. on Industrial Electronics(IECON)*, pp.1626-1631, 2008.
- [2] L. Wang and G. Zhao, "A localization system for mobile robots based vision," *Proc. World Congress on Intelligent Control and Automation(WCICA)*, pp. 6671-6675, 2010.
- [3] 이정우 외, "의료서비스로봇 기술 개발," *로봇과 인간*, vol. 7, no. 4, pp. 26-35, 2010.
- [4] C.-Y. Chan, "A system review of magnetic sensing system for ground vehicle control and guidance", *PATH Research Report*, UCB-ITS-PRR-2002-20, Inst. Transportation Studies, Univ of California at Berkeley, 2002.
- [5] S. Akash, B. Kabi, and S. Karthick, "Implementing a line tracing robot as an effective sensor and closed loop system," *Int. J. Recent Trends in Engineering*, vol. 2, no. 7, pp. 104-107, 2009.
- [6] L. Xiafu and C. Yong, "A design of autonomous tracing in intelligent vehicle based on infrared photoelectric sensor", *Proc. of International Conference on Information Engineering and Computer Science*, pp. 1-4, Wuhan, China, 2009.
- [7] S. Ishikawa, H. Kuwamoto, and S. Ozawa, "Visual navigation of an autonomous vehicle using white line recognition," *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 10, no. 5, pp. 743-749, 1988.
- [8] G. M. Schuster and A. K. Katsaggelos, "Robust line detection using a weighted MSE estimator", *Proc. Int. Conf. on Image Processing*, vol. 1, pp. 293-296, 2003.
- [9] J.-M. Ranger and F. Michaud, "EME - low-cost embedded multiprocessing environment," *Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems(IROS)*, vol. 2, pp. 1416-1421, 2000.
- [10] A. H. Ismail et al., "Vision-based system for line following mobile robot," *Proc. IEEE Symp. Industrial Electronics and Applications*, pp. 4-6, 2009.
- [11] C. Ding et al., "Mobile robot's road following based on color vision and FGA control strategy," *Proc. World*

- Cong. Intelligent Control and Automation(WCICA)*, pp. 3124-3128, 2006.
- [12] E. S. Kim and W. H. Kim, "Positioning sensor system for mobile robots using magnetic markers," *J. Kor. Sensors Soc.*, vol. 19, no. 3, pp. 221-229, 2010.
- [13] S. H. Lee, H. C. Lee, and B. H. Lee, "Implementation of a sensor fusion system for autonomous guided robot navigation in door environments," *J. Kor. Sensors Soc.*, vol. 19, no. 3, pp. 246-257, 2010.
- [14] N. Otsu, "A threshold selection method from gray-level histogram," *IEEE Trans. System, Man, and Cybernetics*, vol. SMC-9, no. 1, pp. 62-66, 1979.
- [15] J. Canny, "A computational approach to edge detection," *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 8, no. 6, pp. 679-698, 1986.



손민혁(Minhyuk Son)

- 2009년 2월 대구대학교 전자공학부(공학사)
- 2011년 2월 대구대학교 대학원 전자공학과(공학석사)
- 주관심분야 : 자동화, 로봇시각, 센서시스템 등



도용태(Yongtae Do)

- 경북대, 서강대, Univ. of Hull(영)의 전자공학과에서 각각 공학사, 공학석사, PhD 학위 취득. Carnegie Mellon Univ, Univ of Wisconsin-Madison, Imperial College London, Nat'l Univ of Singapore 에서 객원교수 및 방문과 학자. 현재 대구대학교 전자공학부 교수. 관심분야는 센서 및 계측 시스템, 기계시각, 지능로봇 등.