

주행 로봇 움직임 추정용 스테레오 적외선 조명 기반 Visibility 센서

Visibility Sensor with Stereo Infrared Light Sources for Mobile Robot Motion Estimation

이 민 영, 이 수 용*
(Min Young Lee¹ and Sooyong Lee¹)
¹Hongik University

Abstract: This paper describes a new sensor system for mobile robot motion estimation using stereo infrared light sources and a camera. Visibility is being applied to robotic obstacle avoidance path planning and localization. Using simple visibility computation, the environment is partitioned into many visibility sectors. Based on the recognized edges, the sector a robot belongs to is identified and this greatly reduces the search area for localization. Geometric modeling of the vision system enables the estimation of the characteristic pixel position with respect to the robot movement. Finite difference analysis is used for incremental movement and the error sources are investigated. With two characteristic points in the image such as vertices, the robot position and orientation are successfully estimated.

Keywords: visibility, localization, stereo infrared light sources

1. 서론

기술의 발전과 함께 로봇은 더 많은 능력을 요구 받게 된다. 로봇은 인간이 접근하기 힘든 유해환경이나 심해 또는 우주에서의 관측, 탐사는 물론 주어진 임무를 수행하고 있으며, 그 기능은 더욱 세분화, 정밀화, 다양화되고 있다. 이러한 기능의 구현을 위한 핵심 기술중의 하나는 위치추정이다. 좀 더 정확하고, 저렴하며, 다양한 환경에 적용 가능하도록 하는 노력이 경주되고 있으나, 기존 기술의 대부분은 이러한 목표들을 모두 동시에 만족시키지는 못하고 있다.

오랜 기간 동안 연구되어온 위치추정 방법들[1,2]은 자연표식/인공표식을 사용한 방법[3,4], 실내외용 GPS를 사용한 방법[5,6], 가속도계, 각속도계등을 사용한 관성항법장치[7]를 기반으로 한 방법, 거리센서와 결합한 SLAM (Simultaneous Localization and Mapping) 방법들[8,9]이 대표적이다. 이중 로봇 위치추정을 위하여 가장 흔히 사용되는 방법은 내부 엔코더 센서를 사용한 dead-reckoning 방법[10]이다. 그러나 주행시 바퀴의 미끄러짐, 주행표면의 평면 정도, 기구학 파라미터값들의 부정확 등의 이유로 dead-reckoning 방법만을 사용한 위치추정은 사용할 수 없으며 누적오차의 증가로 이를 주기적으로 제거하는 추가 방법이 필요하다.

비전기반의 위치추정[11,12]은 카메라를 사용하여 얻은 이미지를 처리하여 표식을 인식하는 방법뿐만 아니라 스테레오 카메라를 사용하여 거리정보를 얻는 방법도 흔히 사용된다. 모노카메라와 구조광을 사용하여 거리를 얻는 방법에 대한 다양한 연구도 수행되고 있다. Pages 등은 3D 거리 지도를

작성하기 위한 다양한 코드화된 조명 투사 방법에 대해 소개하고, 각 패턴의 특징을 분석하여 적합한 측정 표면이나 환경 조건에 대해 기술하였다[13]. Gokturk와 Oggier, Weingarten 등은 3D 거리지도를 구현하기 위한 다른 방법의 하나로서 CMOS 센서 기반의 time-of-flight (TOF) 방법을 설명하고[14-16], Um은 Phong의 조명이론을 기반으로 IPA (Infrared Proximity Array) 센서를 이용하여 광도와 광 센서의 에너지 방정식 관계를 이용한 거리 측정 방법을 제시하였다[17]. Kawasaki 등은 프로젝터에 레이저 포인터를 장착하여 자가보정 알고리즘을 구현하여 선행 보정의 단계를 생략함으로써 설치의 용이함과 사용상의 편의를 제공하는 연구를 진행하였다[18]. 체스보드 모양의 적외선 패턴을 사용한 방법[19]과 스테레오 적외선 구조광을 사용한 방법[20]은 적외선통과필터를 사용하여 구조광의 인식률을 높였으며 모노카메라를 사용하면서도 거리정보를 얻을 수 있었다.

본 논문에서는 구조광을 사용하지 않은 단순한 적외선 조명을 좌우에서 비추어 카메라 전면 장애물의 기하학적 특성을 효율적으로 인식하며, 주행환경의 visibility 분석을 통하여 로봇의 위치를 추정할 수 있는 프레임워크를 소개한다. 초음파 거리센서와 visibility 구역을 이용한 주행로봇의 위치추정[21,22]은 360도 거리 스캔 정보를 사용하여 이를 알려진 환경의 visibility 구역 분석과 비교하여 로봇이 속한 구역을 추정하고 이 구역내의 정확한 위치는 vertex등의 특징점까지의 거리 정보를 사용하여 기하학적으로 구하는 방법이며 거리 센서 측정영역이 전체 환경보다 커야 되는 조건을 만족해야 한다. 그러나 본 논문에서 제안한 방법은 현재 로봇의 위치에서 볼 수 있는 부분 환경만을 사용하므로 거리센서의 측정영역 제한을 받지 않는다.

* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수: 2010. 11. 15., 수정: 2010. 12. 5., 채택확정: 2010. 12. 20.
이민영, 이수용: 홍익대학교 기계시스템디자인공학과
(tmclavis@gmail.com/sooyong@hongik.ac.kr)

II. Visibility 정의와 Visibility 구역

기하학분야에서 visibility polygon은 polygon P 에 속하는 두 점 p, q 를 잇는 직선이 P 에 속하면 $V(q)$ 를 q 의 visibility polygon으로 정의하며 다음과 같이 식으로 표현한다.

$$V(q) = \{p \in P \mid p \text{ sees } q\} \quad (1)$$

그림 1은 위 식에 의하여 정의된 visibility polygon을 나타낸다. 즉, 위치 q 에서 보이는 모든 영역을 나타낸다. 마찬가지로 방법으로 edge E 에 대하여도 visibility polygon을 다음과 같이 정의한다.

$$V(E) = \{p \in P \mid \exists q \in E \text{ such that } p \text{ sees } q\} \quad (2)$$

또한 visibility sector s_i 는 전체 free workspace W 에 대하여 $p \in s_i$ 인 모든 점 p 가 모든 vertices $V_i \subseteq V$ 에서 보이는 최대 영역으로 정의한다.

로봇분야에서 visibility는 장애물 회피, 경로 생성, 위치 추정 등의 분야에 다양하게 활용되고있다[23]. 미지의 환경을 탐색하는 방법으로 visibility가 사용되었고[24], 미지 영역의 크기를 최소화하는 목적으로 경로생성이 이루어졌다. 또는 전체 영역을 동일한 edge가 보이는 구역들로 나누어 위치추정 시 search 영역을 감소하는 방법을 제안하였다[25]. 본 논문에서는 이와 유사한 방법을 사용하여 다수의 edge가 보이는 경우 각 edge에 해당하는 가시영역의 교집합이 로봇이 위치한 영역이 된다. 예를 들어 그림 2와 같이 두개의 장애물 A, B가 존재하는 알려진 환경에 대하여 visibility analysis를 통하여 visibility 구역을 생성할 수 있다. 이때 하나의 구역에 속한 어떤 점에서도 동일한 edge를 보는 특징을 갖는다. Visibility 구역은 각 node에서 보이는 모든 node를 지나는 직선들로 그

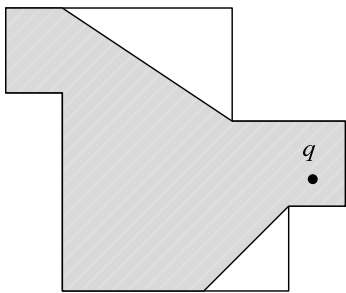


그림 1. 점 q 의 visibility polygon.
Fig. 1. Visibility polygon of a point q .

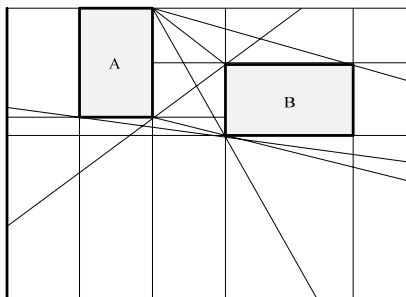
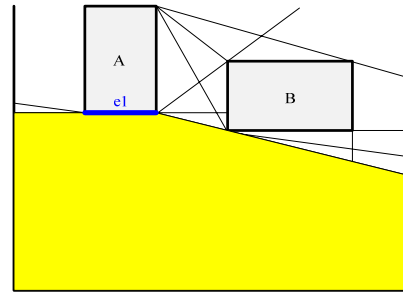
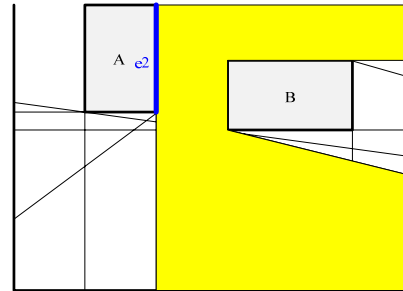


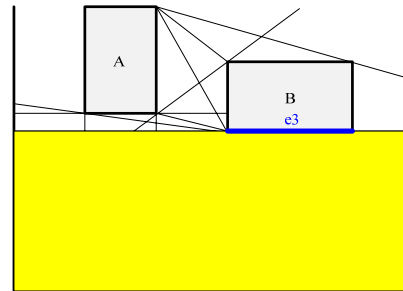
그림 2. Visibility 구역.
Fig. 2. Visibility sector.



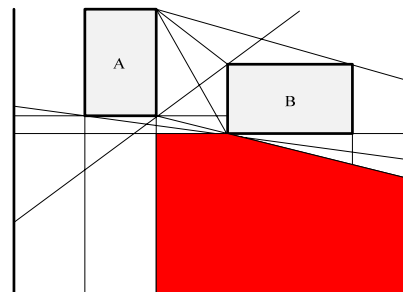
(a) A sector in which e1 edge is visible.



(b) A sector in which e2 edge is visible.



(c) A sector in which e3 edge is visible.



(d) Common area (a) ∩ (b) ∩ (c).

그림 3. Visibility 기반 소속 구역 추정.
Fig. 3. Finding sectors based on the visibility.

경계가 이루어진다. 이 그림에서는 장애물 윗부분의 visibility 구역은 생략하였다. 만약 어느 위치에서 장애물 A의 e1, e2 edge들과 장애물 B의 e3 edge를 본다면 이에 해당하는 구역을 찾고, 이들의 교집합을 구하면 로봇이 위치할 수 있는 구역이 구해진다(그림 3).

본 연구에서는 발견된 edge들로부터 로봇이 현재 속한 구역을 인식하는 것을 바탕으로 로봇의 움직임과 image에서 인식된 edge와 edge의 교점인 vertex의 움직임으로부터 로봇의 움직임을 추정하는 방법을 제안한다. 이를 구하여 먼저 vertex를 더욱 효과적으로 인식하기 위한 방법을 다음 장에 서술한다.

III. 스테레오 적외선 조명 및 카메라

일반 가시광선을 이용한 이미지들은 주변 조명 환경에 대하여 매우 큰 영향을 받으므로, 본 연구에서는 적외선 조명을 사용하였다. 적외선은 가시광선이 아니므로 사용자가 인식할 수 없고, 강인성을 높이기 위하여 카메라의 렌즈 전면에 적외선 조명 LED의 파장영역(850nm) 적외선만 통과시키는 광학식 밴드패스 필터를 장착하였다. 그림 4는 필터가 장착된 카메라를 나타낸다. 사각형의 투영된 조명을 얻기 위하여 적외선 LED를 그림 5와 같이 거울이 부착된 상자내에 설치하여 사용한다.

주변 조명 환경의 영향을 평가하기 위하여 주, 야간(태양광이 있는 경우와 없는 경우)에 각각 형광등을 켜고 끄는 상태에서 위의 카메라를 사용하여 이미지를 얻었다. 가시적인 평가를 위하여 조명장치에 체크보드형상의 패턴을 갖는 스크린을 설치하여 사용하였으며 그 결과는 그림 6과 같다. 이 결과로부터 태양광 및 형광등 조명의 영향이 적다고 판단하였다.

본 연구의 특징은 적외선 조명장치를 좌, 우에 각각 한개씩 설치한 스테레오 조명을 사용하는 것이다. 특히 조명의 방향을 카메라쪽으로 기울여 설치하여 왼쪽 조명과 오른쪽 조명 사용할 때의 투영면의 차이가 발생 할 수 있도록 하였다. 두개의 조명과 카메라로 이루어진 센서시스템은 아래 그림과 같이 구성되었다. 카메라와 조명사이의 거리, 조명의 기울어진 각도는 실험환경에 따라 적절히 조정하며 구체적인 기준은 센서시스템과 장애물사이의 거리에 따라 결정되며 본 논문에 포함된 실험결과는 9도로 고정한 경우이다.

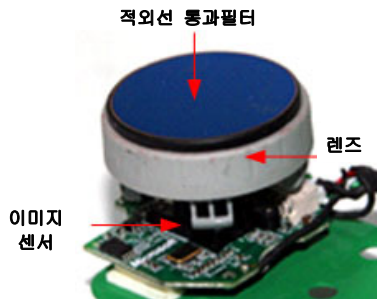


그림 4. 적외선 통과필터를 장착한 카메라.
Fig. 4. A camera with infrared light pass filter.

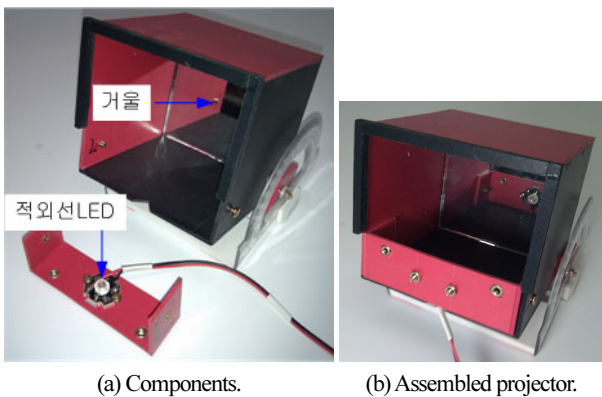


그림 5. 적외선 조명장치.
Fig. 5. Infrared light projector.

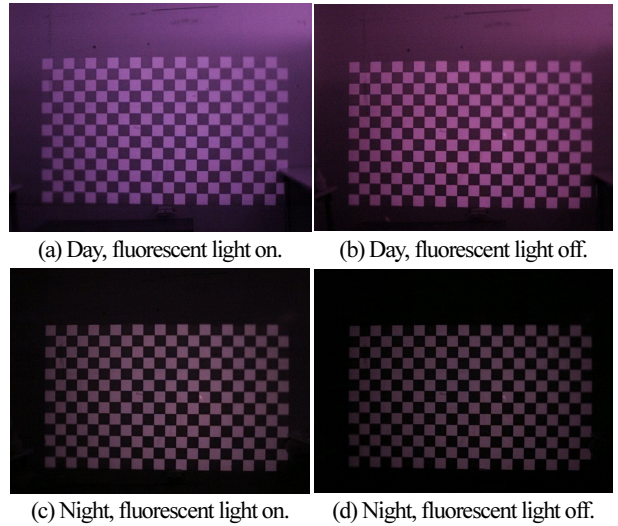


그림 6. 주변 조명 환경에 따른 이미지 영향.
Fig. 6. Effects of sunlight and fluorescent light.

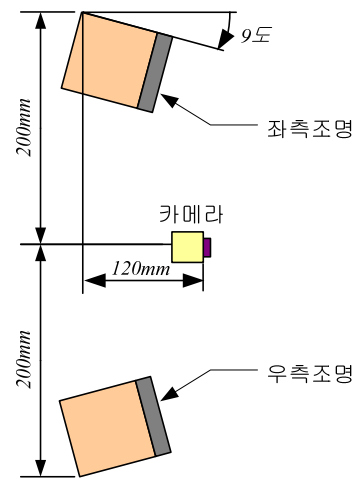


그림 7. 센서시스템.
Fig. 7. Sensor system.

스테레오 조명을 사용함으로써 얻는 효능은 다음 그림과 같다. 그림 8(a)에서 A와 B는 장애물이며 중앙의 카메라 좌, 우에 중심쪽으로 기울어진 적외선 조명장치로 이루어진 센서시스템이 배치되었다. 우측 조명을 켜고 좌측 조명을 꺼놓을 때 조명이 투영된 부분은 그림 8(b)와 같이 장애물B의 앞면 일부와 장애물A의 앞면 일부, 옆면이며, 이 부분이 이미지에 밝게 나타난다. 마찬가지로 좌측 조명이 켜진 경우가 그림 8(c)이다. 이 두개의 이미지를 바탕으로 edge의 구별이 명확해진다.

스테레오 적외선 조명을 사용하면 장애물의 형상이 볼록면(convex)형상인 경우, 좌측이나 우측의 조명 하나만 사용하면 visibility로 인해 사각(死角)영역이 존재할 수 있으나 좌측, 우측의 적외선 조명을 사용하면 이러한 사각영역의 면적을 줄일 수 있고 두 이미지를 합성하면 좌, 우 조명을 각각 사용하는 경우에 비하여 훨씬 분명한 vertex를 추출할 수 있고, 따라서 visibility를 쉽게 추정할 수 있다. 즉 두 개 이미지 차이의 원인이 조명의 visibility이므로, 이미지 차이정보를 사용하여 불연속면이나 vertex를 쉽게 인식할 수 있다. 위와 유사

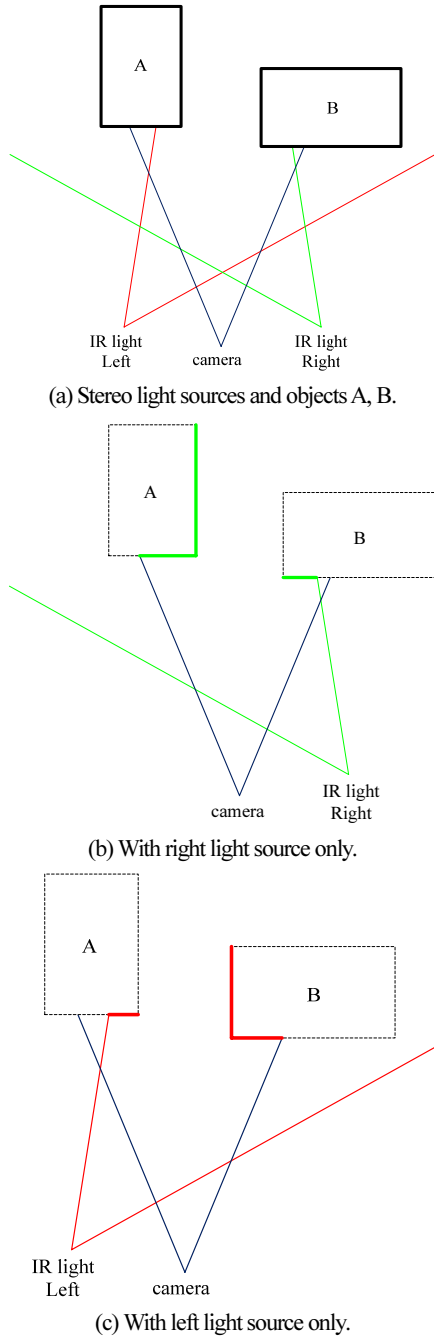


그림 8. 좌우 스테레오 조명을 각각 사용한 경우의 투영 이미지.

Fig. 8. Projected edges with left and right illuminations respectively.

한 환경에서 수행한 실험 결과는 그림 9와 같다.

이 논문에서 제안한 스테레오 적외선 조명을 사용한 센서를 주행로봇에 장착하여 연속적인 측정을 할 때 좌, 우측 적외선 조명을 동시에 사용할 수 없으므로 각각 조명 하나씩만 번갈아 사용한 연속적인 두 개의 이미지를 얻어야 한다. 이때 센서시스템은 그 위치 및 방향의 변동이 없는 제한 조건을 만족해야 한다. 사용된 USB 카메라는 30fps 성능을 갖고 있으므로 이론적인 두 개의 image 사이의 최소 시간차는 1/30초이다. 실내 주행로봇의 주행속도를 고려하면 이 제한 조건을 충분히 만족하는 것으로 가정한다.

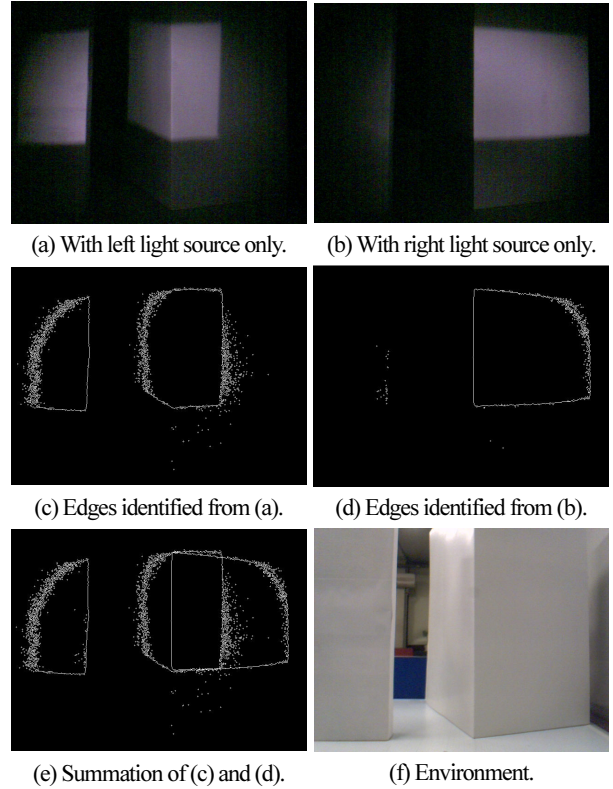


그림 9. 좌, 우 적외선 조명을 사용한 실험 결과.

Fig. 9. Experimental results with left and right infrared lights.

IV. 로봇 움직임 추정

스테레오 적외선 조명을 사용하여 판별한 특징점(vertex)의 이미지상의 위치만으로는 특징점까지의 거리를 구할 수 없다. 본 연구에서는 초음파 센서나 레이저스캐너를 사용하지 않는 것으로 가정하며 구조광이나 스테레오카메라를 사용하지 않으므로 거리 정보를 직접 얻을 수 없다. 하나의 이미지로부터 주행로봇의 절대 위치를 추정할 수 없으나 로봇의 상대적인 움직임과 이미지에서 특징점의 이동량 사이의 관계식을 구하고 이로부터 로봇의 위치추정이 가능한 framework을 구성한다.

다음 그림 10은 1번 위치에서 앞으로 ΔS 만큼 직선 이동한 2번 위치를 나타내며 각 위치에서의 이미지상의 vertex 위치에 관한 기하학 모델이다. 식을 간단히 하기 위하여 기준 위치는 렌즈의 중심으로 설정하였으며 f 는 렌즈의 초점거리이다.

정적 장애물로 가정한 vertex의 절대 위치는 변하지 않으므로 다음과 같은 관계가 성립한다.

$$S_1 - \Delta S = S_2 \tag{3}$$

$$L_1 + \Delta L = L_2 \tag{4}$$

$$\frac{L_1}{f} = \frac{d}{S_1} \tag{5}$$

$$\frac{L_2}{f} = \frac{d}{S_2} \tag{6}$$

따라서

$$L_1 S_1 = (L_1 + \Delta L)(S_1 - \Delta S) \tag{7}$$

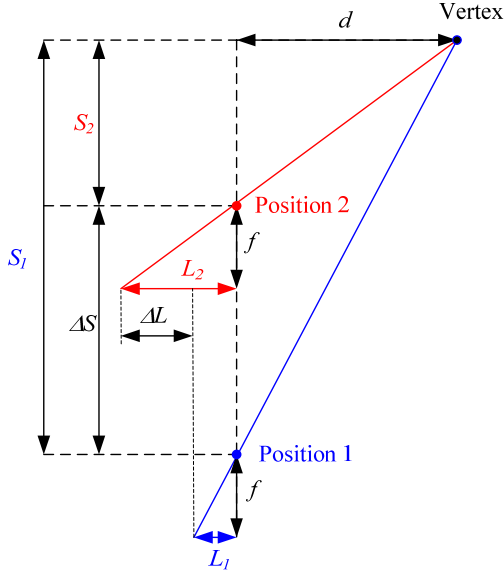


그림 10. 전진 이동한 경우의 이미지상의 특이점 위치 변화.
Fig. 10. Position of the corresponding pixel when the camera moved forward.

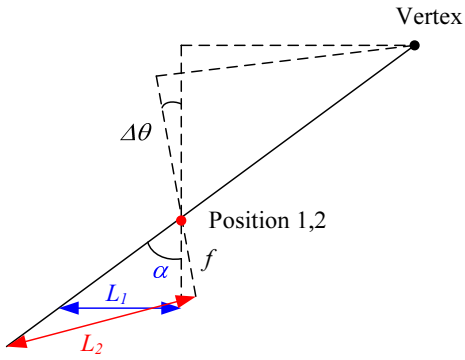


그림 11. 회전 이동한 경우의 이미지상의 특이점 위치 변화.
Fig. 11. Position of the corresponding pixel when the camera rotated.

미소 움직임을 가정하므로 $\Delta L \Delta S$ 항을 무시하면

$$\Delta L = \frac{L_1}{S_1} \Delta S \quad (8)$$

렌즈의 초점거리 f 는 렌즈의 고유 특성값이며 L_i 은 이미지에서 측정된 vertex에 해당하는 pixel의 위치이다. 식에서 알 수 있듯이 L_i 값만으로는 d 와 S_i 값을 구할 수 없고, (5), (6)의 관계만 성립한다.

위 그림 11의 움직임은 로봇이 렌즈 중심점을 기준으로 $\Delta\theta$ 만큼 회전한 경우이다. 이 경우 다음과 같은 관계식이 성립한다.

$$\alpha = \tan^{-1}\left(\frac{L_1}{f}\right) \quad (9)$$

$$\Delta\theta = \tan^{-1}\left(\frac{L_1 + \Delta L}{f}\right) - \tan^{-1}\left(\frac{L_1}{f}\right) \quad (10)$$

$$\Delta L = L_1 \frac{\tan(\alpha + \Delta\theta) - \tan \alpha}{\tan \alpha} \quad (11)$$

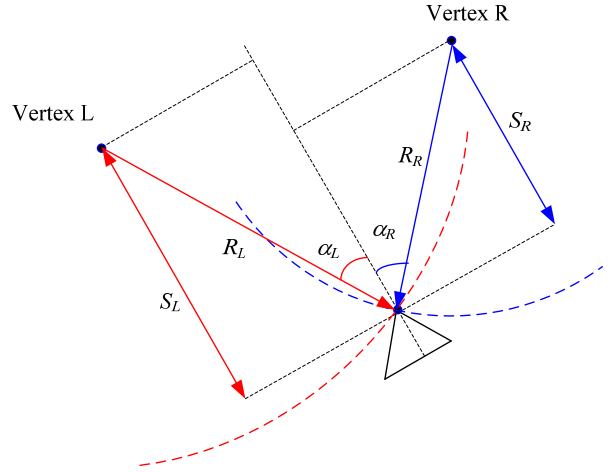


그림 12. 두 vertex로부터의 거리값을 사용한 위치 추정.
Fig. 12. Position estimation using the distances from vertices.

로봇의 전진 방향 움직임과 회전 움직임이 서로 독립적이라고 가정하면 (8)과 (11)로부터 다음과 같이 정리된다.

$$\Delta L = L_1 \frac{\tan(\alpha + \Delta\theta) - \tan \alpha}{\tan \alpha} + \frac{L_1}{S_1} \Delta S \quad (12)$$

(12)를 사용하여 로봇의 움직임 ΔS , $\Delta\theta$ 및 이미지상의 위치 변화량 ΔL 값으로부터 S_i 값을 추정할 수 있다. 이로부터 로봇의 위치를 유일하게 정의할 수 없으나 두개의 vertex가 이미지상에서 존재하는 경우는 다음 그림과 같이 그 위치를 추정할 수 있다. 각 vertex로부터 거리를 계산하여 이를 반지름으로 하는 원과 다른 vertex를 중심으로 하는 원의 교점으로 로봇의 추정 위치이다.

다양한 이동궤적 실험을 통하여 개발된 시스템의 성능을 평가하였고, 다음의 결과는 그 중 하나이다. 이미지에서의 수직 edge를 2차원 평면의 vertex로 사용하였다. 로봇이 이동하며 총 66 샘플의 이미지를 저장하였다. 간편한 계산을 위하여 초기 위치를 (0,0), 초기 각도를 0도로 설정하였으며 두 개의 고정 장애물이 존재하는 환경에서 실험하였다. 엔코더값으로부터 계산한 전진방향 이동거리 변화량 ΔS 와 각도 변화량 $\Delta\theta$ 값들을 그림 13에 나타내었다. 초기에는 직진하였으며 30번째 샘플링부터 시계방향으로 회전하며 전진, 50번째

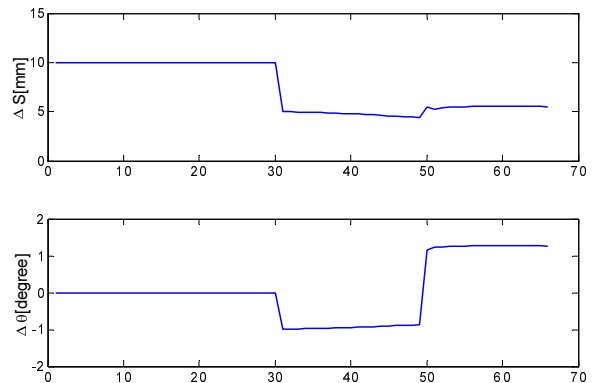


그림 13. 로봇의 전진방향 움직임(ΔS)과 회전양($\Delta\theta$).
Fig. 13. Forward and angular movements of the robot.

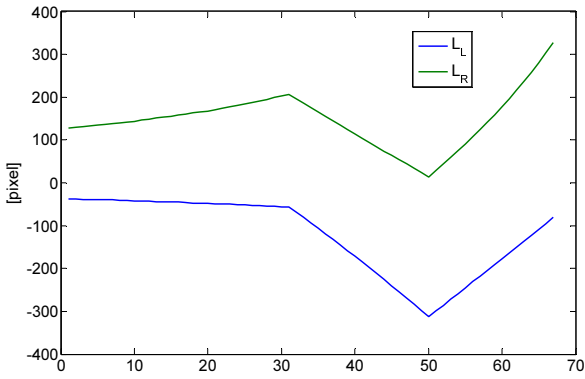


그림 14. 이미지에서 추출한 좌, 우측 edge의 L 값 변화.
Fig. 14. L values of two vertical edges in the image.

부터 시계반대방향으로 회전하며 전진하였다.

위 그림은 로봇이 이동하며 얻은 이미지에서 추출한 두개의 수직 edge의 이미지에서의 x 좌푯값 변화를 보여준다. 실험에 사용된 카메라의 해상도는 800×600 이며 이미지에서 x 좌푯값은 좌측으로부터 시작하여 1에서 800까지 값을 갖는다. 이미지의 x 좌푯값이 400인 pixel을 x 방향 정중앙 기준 pixel로 사용하였으며, 그림에 표시한 L 값은 각 edge의 중앙 pixel x 좌푯값에서 400을 뺀 값이다. 그림에서 L_L 은 좌측 edge의 L 값, L_R 은 우측 edge의 L 값을 나타낸다.

매 위치에서 측정된 L 값들로부터 매 샘플링마다 변화량 ΔL 을 구하며, 이와 함께 ΔS 와 $\Delta \theta$ 값들을 (12)에 대입하여 각 vertex에 대한 S 값을 구한다. 이를 측정된 α 값과 함께 사용

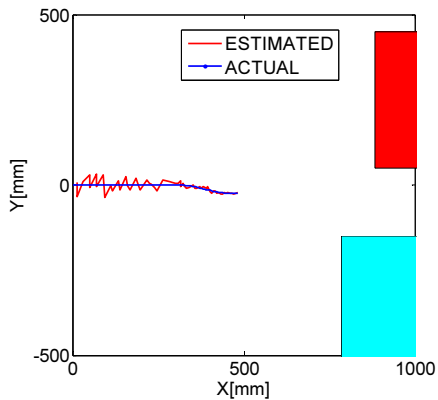


그림 15. 로봇의 실제 위치와 추정 위치.
Fig. 15. Actual and estimated robot position.

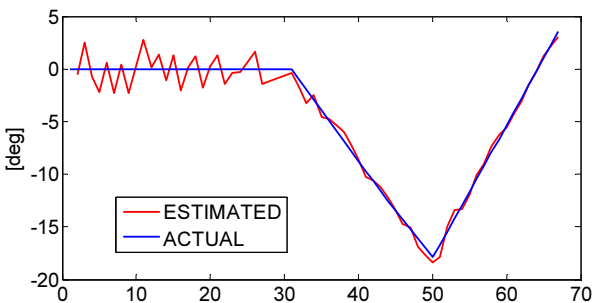


그림 16. 추정 방향각.
Fig. 16. Estimated orientation.

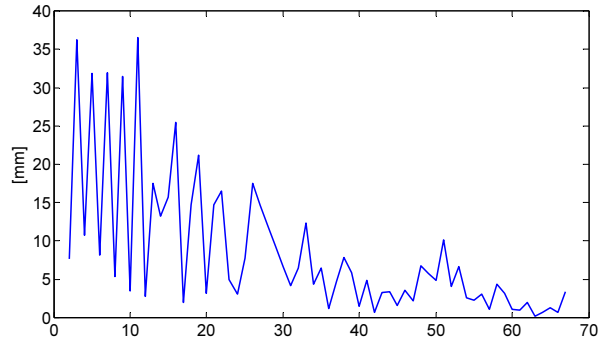


그림 17. 추정 위치의 제곱근 오차.
Fig. 17. Root squared errors of the estimated position.

하여 각 vertex로부터의 거리를 구하며, 이로부터 로봇의 절대위치를 계산한다. 위치 추정 결과를 실험환경과 함께 그림 15에 나타내었으며, 그림 16은 각 샘플링에서의 추정 방향각이다.

정량적인 오차는 다음과 같은 식을 사용하여 매 샘플링에서의 오차값을 그림 17에 나타내었다.

$$error[i] = \sqrt{(x_e[i] - x_r[i])^2 + (y_e[i] - y_r[i])^2} \quad (13)$$

여기서 (x_e, y_e) 는 추정 위치 좌푯값, (x_r, y_r) 는 실제 위치 좌푯값이다.

초기 오차는 vertex로부터의 거리값이 큰 경우 이미지 pixel들에 해당하는 좌푯값의 정수값으로 어림수화(rounding)가 그 원인들 중의 하나이다. 정량적인 오차결과와 실제 로봇의 움직임을 비교해보면 직선 전진 움직임의 경우 오차가 크고, 회전하며 전진할 때 오차가 작다고 판단할 수 있으나, 이보다는 지속여기조건(persistent excitation condition)과 관련하여 설명할 수 있다. 즉, (12)에서 볼 수 있듯이 본 논문에서 제안한 방법은 한 위치에서 얻은 이미지에서 현재 위치를 추정하는 것이 아니라, 연속한 두 샘플링 사이의 로봇 움직임과 이미지에서 vertex에 해당하는 pixel의 좌푯값 변화 사이의 관계식으로부터 로봇의 위치를 추정하는 것이다. 따라서, 로봇의 위치 변화가 충분히 크지 않거나, 이미지에서 vertex의 pixel 좌푯값 변화가 크지 않은 경우에는 추정 오차가 크다. 앞서 설명된 실험의 L 값(그림 14)로부터 그 변화량만 구하면 그림

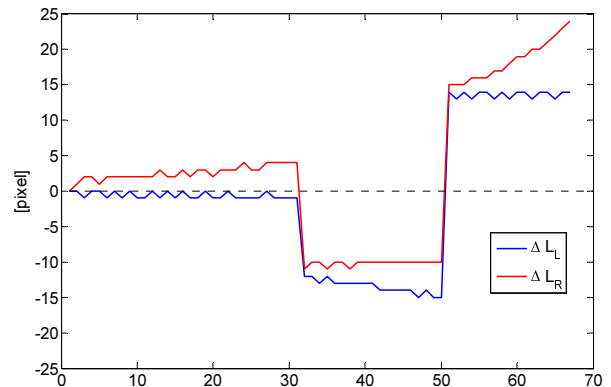


그림 18. 이미지에서 추출한 좌, 우측 edge의 L 값 변화량.
Fig. 18. Change of L values of two vertical edges in the image.

18과 같다.

위 그림에서 알 수 있듯이 직진하는 구간(30번째 샘플링까지)은 L 값의 변화량(크기)이 적으나, 그 이후에는 변화량이 상대적으로 커지고 이 값을 사용한 추정결과의 오차가 줄어드는 것으로 분석된다. L 값의 변화량은 직진, 회전운동여부뿐만 아니라 환경내에서의 카메라의 지향방향 및 장애물 배치등의 영향을 받는다. 이러한 분석의 타당성을 검증하기 위하여 총 66개의 샘플 데이터로 이루어진 위 실험결과중 L 값의 변화량이 상대적으로 적은 초기 30개의 데이터에 대하여 L 값의 변화량 계산 방법을 수정하였다. 이 방법은 연속한 두 샘플사이의 차이값의 크기를 사용한 것이 아니라 현재 것과 다섯번 이전의 샘플사이의 차이를 사용한 것이다. 이 방법으로 구한 좌측, 우측 edge의 ΔL 값은 다음 그림 19에 나타내었으며, 그림 18과 비교하여 30번째 샘플까지의 ΔL 값 크기가 훨씬 커진 것을 알 수 있다. 초기 5번째까지의 샘플은 데이터가 충분하지 않으므로 처음 데이터와의 차이를 구하였다. 이 값을 사용하여 현재 위치를 추정된 후 (13)을 사용하여 구한 추정위치의 제곱근 오차는 그림 20과 같다.

이 결과에서 알 수 있듯이 수정된 방법이 적용된 6번째 샘플부터의 결과를 이전 방법으로 구하였던 그림 17과 비교해보면 오차의 크기가 훨씬 줄어든 것을 알 수 있다. 또한 ΔL 값의 크기를 이 논문에서 제안한 방법을 적용할 수 있는 조건으로 활용 할 수 있다.

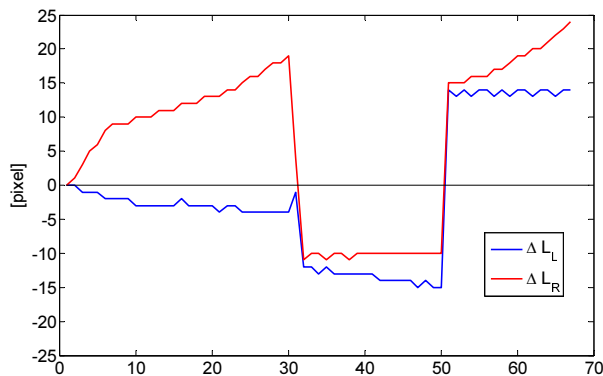


그림 19. 수정된 방법으로 계산한 좌, 우측 edge의 L 값 변화.
Fig. 19. Change of L values of two vertical edges with modified method.

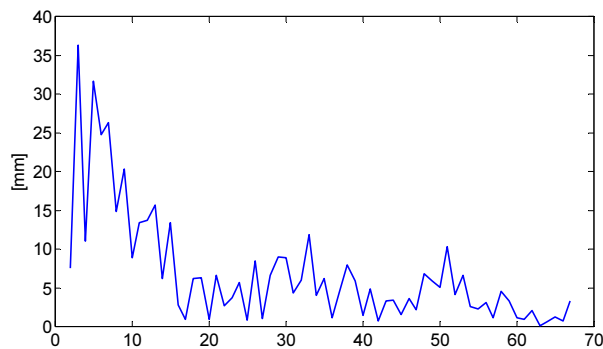


그림 20. 수정된 방법을 사용한 추정 위치의 제곱근 오차.
Fig. 20. Root squared errors of the estimated position with modified method.

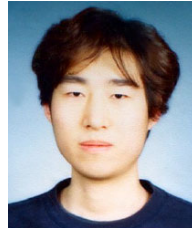
V. 결론

본 논문에서는 단일 카메라와 스테레오 적외선 조명을 이용한 주행 로봇의 위치 추정 방법을 설명하였다. 스테레오 적외선 조명을 사용하여 보다 효율적인 edge 인식이 가능하며, 이 정보를 이용하여 로봇의 위치 추정이 이루어졌다. 로봇의 절대위치 값을 사용하지 않고, 연속된 두 이동 점에서 얻은 이미지에서 특징점 위치 변화량과 로봇의 상대적인 이동량과의 관계식을 통하여 보다 간단한 계산을 통하여 로봇의 위치를 추정할 수 있었다. 추정 오차의 원인에 대한 분석과 제안한 방법을 적용할 수 있는 조건에 대한 고찰이 이루어졌다.

참고문헌

- [1] J. Borenstein, H. Everett, L. Feng, and D. Wehe, "Mobile robot positioning: Sensors and techniques," *Journal of Robotic Systems*, vol. 14, no. 4, pp. 231-249, 1997.
- [2] I. J. Cox, "Blanche: Position estimation for an autonomous robot vehicle," *Autonomous Mobile Robots: Control, Planning, and Architecture*, IEEE Computer Society Press, Los Alamitos, CA, pp. 285-292, 1991.
- [3] D. C. K. Yuen and B. A. MacDonald, "Vision-based localization algorithm based on landmark matching, triangulation, reconstruction, and comparison," *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 21, no. 2, pp. 217-226, April 2005.
- [4] R. Sim and G. Dudek, "Mobile robot localization from learned landmarks," *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, vol. 2, pp. 1060-1065, 1998.
- [5] E. D. Kaplan, *Understanding GPS: Principle and Applications*, 1st Ed., Boston, MA: Artech House, 1996.
- [6] J. Yun, S. Kim, and J. Lee, "Robust positioning a mobile robot with active beacon sensors," *LNAI 4251*, Part I, pp. 890-897, Oct. 2006.
- [7] B. Barshan and H. F. Durrant-Whyte, "Inertial navigation systems for mobile robots," *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, vol. 11, pp. 328-342, June 1995.
- [8] H. Durrant-Whyte and T. Bailey, "Simultaneous Localization and Mapping (SLAM): Part I The Essential Algorithms," *Robotics and Automation Magazine*, vol. 13, no. 2, pp. 99-110, 2006.
- [9] T. Bailey and H. Durrant-Whyte, "Simultaneous localization and mapping (SLAM): part II," *Robotics and Automation Magazine*, vol. 13, no. 3, pp. 108-117, 2006.
- [10] C. M. Wang, "Location estimation and uncertainty analysis for mobile robots," *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 1230-1235, 1988.
- [11] G. Hager and S. Atiya, "Real-time vision-based robot localization," *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, vol. 9, no. 6, pp. 785-800, 1993.
- [12] G. Adomi, S. Cagnoni, S. Enderle, and G. K. Kraetschmar, "Vision-based localization for mobile robots," *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 36, pp. 103-119, 2001.
- [13] J. Pages, J. Salvi, R. Garcia, and C. Matabosch, "Overview of coded light projection techniques for automatic 3D profiling," *IEEE International Conference on Robotics & Automation*, vol. 1, pp. 133-138, Sep. 2003.
- [14] S. B. Gokturk, H. Yalcin, and C. Bamji, "A time-of-flight depth sensor - system description, issues and solutions," *IEEE*

- Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops (CVPRW'04)*, pp. 35-43, June 2004.
- [15] T. Oggier, P. Seitz, and N. Blanc, "Miniaturized all-solid-state 3D camera for real-time range imaging" *Performance Metrics for Intelligent Systems Workshop*, National Institute of Standards and Technology, Aug. 2004.
- [16] J. W. Weingarten, G. Gruener, and R. Siegwart, "A state-of-the-art 3D sensor for robot navigation," *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, vol. 3, pp. 2155-2160, Oct. 2004.
- [17] D. Um and W. N. P. Hung, "A novel infrared proximity array sensor for 3D visual sensing: Modeling and applications," *IEEE Conference on Robotics, Automation and Mechatronics*, pp. 1-6, Dec. 2006.
- [18] H. Kawasaki, Y. Ohsawa, R. Furukawa, and Y. Nakamura, "Coded structured light based uncalibrated stereo system," *ICCV2005 International Conference on Computer Vision*, 2005.
- [19] I. Kim and S. Lee, "3D range measurement using infrared light and a camera," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems*, vol. 14, no. 10, pp. 1005-1013, October 2008.
- [20] S. Lee and J.-B. Song, "3D environment perception using stereo infrared light sources and a camera," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems*, vol. 15, no. 5, pp. 519-524, May 2009.
- [21] S. Lee, N. M. Amato, and J. Fellers, "Localization based on visibility sectors using range sensors," *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, vol. 4, pp. 3505-3511, 2000.
- [22] J. Kim, R. A. Pearce, and N. M. Amato, "Feature-based localization using scannable visibility sectors," *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, vol. 2, pp. 2854-2859, 2003.
- [23] E. Morini, F. Rocchi, C. A. Avizzano, and M. Bergamasco, "Visibility techniques applied to robotics," *IEEE RO-MAN*, Viareggio, pp. 367-372, Sep. 2010.
- [24] T. Bandyopadhyay, Z. Liu, M. H. Ang, and W. K. G. Seah, "Visibility-based exploration in unknown environment containing structured obstacles," *12th International Conference on Advanced Robotics*, pp. 484-491, 2005.
- [25] K. T. Simsarian, T. J. Olson, and N. Nandhakumar, "View-invariant regions and mobile robot self-localization," *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, vol. 12, no. 5, pp. 810-816, 1996.



이 민 영

2010년 홍익대학교 기계시스템디자인공학과 졸업. 2010년~현재 홍익대학교 대학원 기계공학과 석사과정 재학중. 관심분야는 위치추정.



이 수 용

1989년 서울대학교 기계공학과(공학사). 1991년 서울대학교 기계공학과(공학석사). 1996년 MIT 기계공학과(공학박사). 1996년~1999년 한국과학기술연구원 선임연구원. 2000년~2003년 Texas A&M 대학 기계공학과 조교수. 2003년~현재 홍익대학교 기계시스템디자인공학과 부교수. 관심분야는 Robotics.