

이동 로봇의 강인 위치 추정을 위한 단안 비전 센서와 레이저 구조광 센서의 베이시안 센서융합

Bayesian Sensor Fusion of Monocular Vision and Laser Structured Light Sensor for Robust Localization of a Mobile Robot

김민영*, 안상태, 조형석

(Min Young Kim, Sang Tae Ahn, and Hyungsuck Cho)

Abstract: This paper describes a procedure of the map-based localization for mobile robots by using a sensor fusion technique in structured environments. A combination of various sensors with different characteristics and limited sensibility has advantages in view of complementariness and cooperation to obtain better information on the environment. In this paper, for robust self-localization of a mobile robot with a monocular camera and a laser structured light sensor, environment information acquired from two sensors is combined and fused by a Bayesian sensor fusion technique based on the probabilistic reliability function of each sensor predefined through experiments. For the self-localization using the monocular vision, the robot utilizes image features consisting of vertical edge lines from input camera images, and they are used as natural landmark points in self-localization process. However, in case of using the laser structured light sensor, it utilizes geometrical features composed of corners and planes as natural landmark shapes during this process, which are extracted from range data at a constant height from the navigation floor. Although only each feature group of them is sometimes useful to localize mobile robots, all features from the two sensors are simultaneously used and fused in term of information for reliable localization under various environment conditions. To verify the advantage of using multi-sensor fusion, a series of experiments are performed, and experimental results are discussed in detail.

Keywords: sensor fusion, mobile robot localization, laser vision sensor, monocular vision, environmental features

I. 서론

로봇 기술의 급속한 발달과 더불어, 로봇은 산업제품 생산에 핵심적인 요소가 되고 있으며, 인간 생활과 밀접한 서비스 로봇에 대한 필요성이 최근 증대하고 있다. 다양하고 고도화된 기능의 로봇 개발과 함께 작업 수행 능력이 증가하고 있고, 작업 공간도 로봇의 이동성과 함께 점점 확장되고 있기 때문에, 이동 작업공간 내에서 로봇이 자기 위치를 파악하는 것은 작업 수행에 필수적인 요소기능이라 할 수 있다. 이동 로봇이 자기 현재 위치를 알기 위해서는 여러 가지 센서의 정보를 활용해야 한다. 이동 로봇의 연구 초기에는 이동로봇이 자기 위치 추정을 위하여 모터에 장착된 엔코더, 레이저 거리계[1-3], 구조광 시스템[4-5], 카메라[6-8], 초음파 센서[9-11], 적외선 센서 등의 센서를 단독으로 사용하는 연구가 수행되었다. 단일 센서를 이용한 환경 인식은 각 센서의 자체 특성 때문에 환경 인식에 한계가 존재한다. 최근 들어 이동 로봇에 장착된 복수개의 센서로부터 획득한 환경 정보를 융합하여 주위 환경을 인식하는 센서 융합 연구가 활발하다. 각 센서가 가지고 있는 장점과 단점을 센서 정보의 융합을 통하여 상호 보완함으로써 획득 정보의 불확실성을 줄이고 신뢰도를 높일 수 있다는 장점 때문이다.

이동 로봇의 주위 환경인식을 위해 자주 사용되는 센서는 표 1에 정리된 단안 비전 센서와 레이저 구조광 센서가 대표적이며, 이를 중심으로한 센서융합의 사례가 대다수이다. 하

지만, 대부분의 단안 비전 센서를 이용한 위치 추정에서는, 조명 조건이 변하게 되면 카메라의 환경인식에 추가적인 영상처리 과정이 요구되므로, 실내 조명 조건이 일정하게 유지되는 환경 하에서 실험이 수행된다[6]. 특히, 단안 비전과 레이저 거리계를 동시에 사용하여 센서의 정보를 융합하고자 하는 연구 사례[12]에서도, 카메라로부터 환경 수직 모서리 정보의 추출 시 조명 반사에 의한 영상 잡음 때문에, 광노이즈가 상대적으로 적은 입력 영상 하단부만을 사용하기도 하였다. 또한 단안 비전과 초음파 센서를 이용한 센서 융합을 시도한 사례[13]가 있지만, 초음파와 비전의 해상도가 상호 맞지 않는 단점이 있고, 복도 환경에서 벽면에 수직인 거리만 보상이 가능하다는 단점이 있다. 초음파와 레이저 거리계를 융합한 사례[14]에서는 초음파와 레이저 거리계를 동시에 이용하여 위치 추정 및 지도작성 특징치 추출의 강인성을 이끌어 내고자 하였다. 최근 레이저 거리계와 단안 비전을 이용하여, 확장 칼만 필터기법으로 위치추정에 응용하는 사례[15]가 있었으나, 환경의 변화에 대해서는 센서의 신뢰도를 변화시키거나 알고리즘을 변화하려는 시도가 없었다.

실제로 이러한 로봇들은 변경 없는 실험실 환경에서만 사

표 1. 단안비전과 레이저 구조광 센서 특징비교

Table 1. Monocular vision vs. Laser structured light sensor.

Sensor	Characteristics
Monocular vision	- Passive sensor - Insensitive to object characteristics - Sensitive to illumination condition
Laser structured light sensor	- Active sensor - Insensitive to illumination condition - Sensitive to object characteristics

* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수: 2009. 6. 9., 수정: 2009. 9. 18., 채택확정: 2010. 1. 10.

김민영: 경북대학교 전자전기컴퓨터학부(mykim@ee.knu.ac.kr)

안상태: 국방과학연구소(congzi@add.re.kr)

조형석: 한국과학기술원 기계공학과(hscho@kaist.ac.kr)

용되는 것이 아니기 때문에 다양한 조명 환경 변화 및 물체 가림에 대해서도 강인한 위치 추정정보를 이끌어 낼 수 있는 연구의 필요성이 있다. 본 연구에서는 상호 보완적인 기능을 제공할 수 있는 수동 센서로 분류되는 단안 비전과 능동 센서로 분류되는 레이저 구조광 센서를 혼용하여 획득 정보의 신뢰도가 높으면서도 조명 조건의 변화에 보다 강인한 센서 시스템을 구성하고, 두 센서로부터 획득되는 환경 정보를 융합함으로써, 이동 로봇의 위치를 외부 환경 변화에 강인하게 추정하는 연구를 수행한다.

II. 주행 환경에서의 환경 특징치 추출

1. 이동 로봇과 센서 시스템

그림 1은 본 연구에서 사용한 이동 로봇과 단안 비전과 레이저 구조광 센서시스템으로 구성된 복합 센서 시스템이다. 센서 시스템은 단안 비전과 레이저 구조광 센서 시스템이 동축의 시각방향 변환 팬틸트 장치에 장착되어 이동 로봇의 전방 환경을 스캐닝하면서 180도 범위로 측정할 수 있도록 구성되어 있다. 표 2는 센서 시스템의 간략한 사양을 보여준다.

2. 대상 환경과 환경 특징치의 정의

본 연구의 대상환경은 바닥이 평평하고, 벽이나 기둥, 혹은 주행 경로상의 환경 구성물체가 바닥에 대하여 동일한 수직 단면을 가져 주행환경을 2차원으로 표시할 수 있는 경우를 다룬다. 대상 환경에 대한 대부분의 지도는 사전에 주어진다 고 가정한다. 일반적인 사무환경 또는 실내 환경 하에서 가장 많이 나타나는 환경 형태는 수직 기둥 형상과 환경의 내

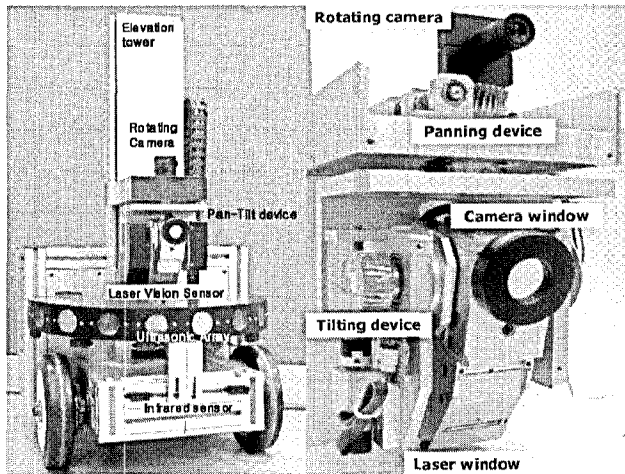


그림 1. 이동 로봇 시스템.
Fig. 1. Mobile robot system.

표 2. 센서 시스템 사양.

Table 2. Sensor system specifications.

Sensor	Specification
Monocular vision	- Toshiba IK-M41MA : Monochromatic CCD - 753x486 pixels (H*V) - Lens : f = 15mm / 25° view angle
Laser structured light sensor	- 680nm 30mW Laser - 680nm Band pass filter : Coherent - Measurement Accuracy < 2cm (at 3m dist.) - Same camera system with monocular vision

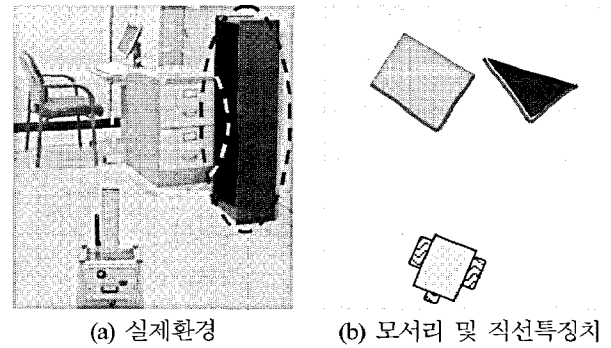


그림 2. 레이저 구조광 센서의 환경 특징치.
Fig. 2. Environmental features of laser structured light sensor.

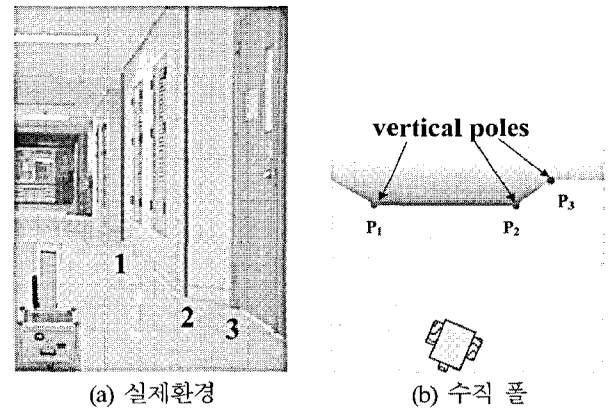


그림 3. 단안 비전센서의 환경 특징치.
Fig. 3. Environmental features of monocular vision.

에 존재하는 대상 물체들이 표현하는 모서리 정보라고 할 수 있다.

수직 기둥 형상을 가진 구조물들은 높이 방향에 대해 형상의 변화가 없기 때문에 2차원 평면에 투영하게 되면 다각형으로 표현이 가능한 것들이 대부분이다. 레이저 구조광을 이용한 비전 센서를 이용할 경우 환경에 존재하는 물체에 맺힌 레이저의 형상의 변화를 특징치로 추출하여 물체의 특징적인 형상을 파악할 수 있다(그림 2). 이러한 다면체들로 구성된 환경 하에서 나타나는 특징치는 면과 면이 이루는 사이각, 그 위치, 그리고 각 면의 길이이다. 이중에서 면과 면이 이루는 사이각에 의해 형성되는 특징을 모서리 특징치 그리고 각 면의 길이방향 특징을 직선 특징치라 칭하기로 한다. 본 연구에서는 레이저 구조광 센서를 이용하여 이 특징치들을 추출하고, 이를 이용하여 이동 로봇의 위치를 추정한다.

환경의 직선 특징치 중에서 특히 바닥에 대하여 수직인 수직 모서리(vertical edge)들은 높이 방향으로 변화가 없어서 2차원 평면 상에 투영하였을 경우 하나의 점의 형태로 나타나는 수직 폴(vertical pole)로 표시된다(그림 3). 이러한 수직 모서리들은 일반적인 실내 환경에서 쉽게 발견될 수 있는 중요한 특징치이다. 본 연구에서는 단안 비전 센서를 이용하여 추출된 수직모서리 특징치들을 이동 로봇의 위치 추정에 활용한다.

3. 영상 획득 및 환경 특징치 추출

주위 환경 정보를 얻기 위하여 사용하는 센서는 모두 카메라를 이용하여 영상을 획득하고, 영상 처리 과정을 통하여

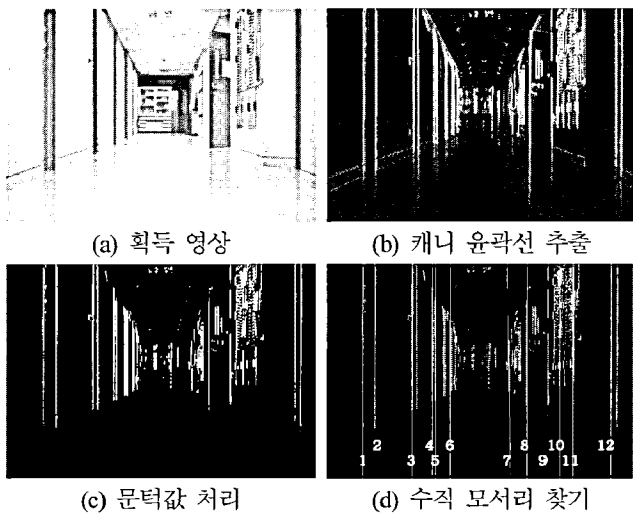


그림 4. 단안 비전의 밝기 영상에 대한 영상처리.
Fig. 4. Image processing on intensity image of monocular vision.

원하는 특징치를 추출하는 방식을 취한다.

첫째로, 흑백 카메라 영상으로부터 수직 모서리를 추출하여 이를 위치 추정을 위한 정보로 사용한다. 특징치 추출의 전반적 순서는 그림 4에 정리하였다.

수직 특징치 추출을 위해, 영상 잡음에 상대적으로 둔감한 윤곽선 추출 방법인 캐니(canny)방법을 사용하였다. 가우시안(Gaussian) 마스크를 이용하여 잡음을 제거한 후 소벨 마스크 기반 윤곽선 검출 마스크를 적용하였다. 일반적으로 소벨 방법은 x축 미분 연산자와 y축 미분 연산자를 사용하여 전(全)방향의 윤곽선 정보를 추출하지만, 본 연구에서는 수직 모서리만을 추출하는 x축 미분 연산자인 수직 마스크(vertical mask)를 이용한다. 수직 방향의 윤곽선 영상에서 노이즈에 강인한 수직모서리 추출을 위해, 윤곽선 잡음 제거 후 호프 변환(hough transform) 기법을 적용한다. 호프 변환은 원하는 기울기의 직선성분을 선별해 낼 수 있다.

둘째로, 레이저 구조광 센서를 이용하여, 실내 복도 환경의 획득 영상으로부터 모서리 및 직선 특징치를 추출하여 이를 위치 추정을 위한 정보로 사용한다. 그림 5와 같이 대상 환경에 레이저 띠를 주사하여 물체 표면에 맺힌 띠를 영상으로

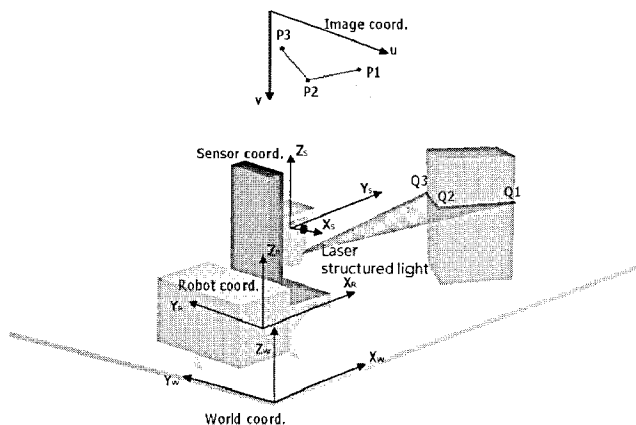


그림 5. 레이저 구조광 센서 시스템의 환경 측정.
Fig. 5. Environmental measurement by a laser structured light sensor.

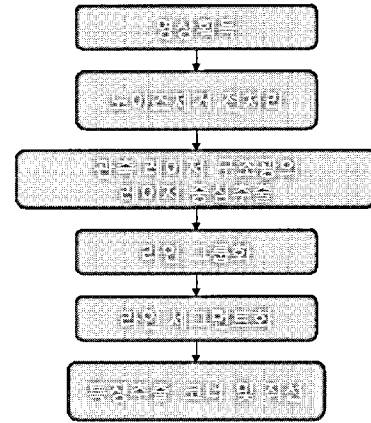


그림 6. 레이저 구조광 센서 영상의 특징치 추출.
Fig. 6. Image-processing in a laser structured light sensor.

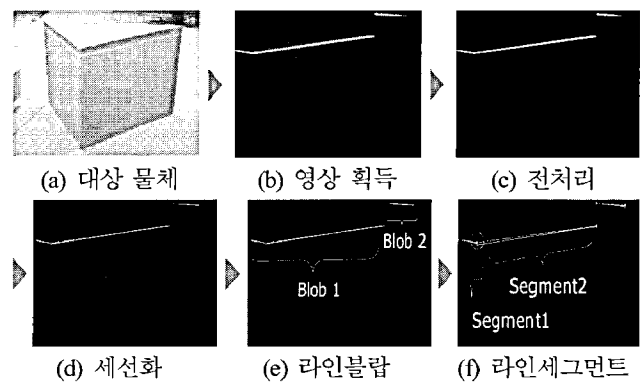


그림 7. 레이저 구조광 센서의 영상 처리.
Fig. 7. Image processing from laser structured light sensor.

획득한다. 대상물체의 Q_1, Q_2, Q_3 의 특징점이 영상센서의 uv 좌표계에서 P_1, P_2, P_3 로 변환되면, 이를 이용하여 특징점을 센서 좌표계 X_s, Y_s, Z_s 의 거리좌표정보로 변환하고, 다시 로봇 좌표계 X_r, Y_r, Z_r 의 거리좌표 정보로 이를 변환하여, 로봇을 중심으로 한 환경특징의 거리좌표를 추출한다. 레이저 구조광 센서의 전면인 그림 1의 카메라 원도우에, 레이저 주파수에 해당하는 밴드패스 필터를 적용하여, 센서 취득 영상에서 레이저 구조광이 선명하게 표시되도록 한다. 획득된 영상으로부터 그림 6의 영상처리 과정을 거쳐 환경 특징치인 모서리와 직선 정보가 추출된다. 전처리 과정에서 취득된 영상의 잡음을 제거하고, 레이저 띠의 중심선을 추출하는 세션화 과정을 거쳐서, 라인 블라빙(line blobbing) 과정을 통해, 추출한 레이저 띠의 중심선을 그룹화 한다. 마지막으로 라인블랍(line blob)내의 변곡점을 추출하는 라인 세그먼트(line segment)과정을 거치게 된다. 이 과정을 통하여 다면체 환경의 모서리 특징치와 직선 특징치가 추출되게 된다[5]. 그림 7은 영상처리의 예를 보여준다.

III. 단일 센서를 이용한 이동 로봇의 위치 추정

본 연구에서 이동 로봇의 위치 추정은 3가지 단계를 거쳐 이루어진다. 먼저 카메라를 이용하여 획득한 환경 특징치를 이용하여 위치 추정을 하고, 레이저 구조광 센서를 이용하여 획득한 환경 특징치를 이용하여 위치 추정을 한다. 각 센서를 이용하여 얻은 위치 추정의 결과를 최종 단계에서 융합함

으로써 이동 로봇의 위치를 추정하게 된다.

1. 단안 비전 센서를 이용한 위치 추정

추출된 수직 모서리를 이용하여 위치를 추정하는 방법 중 에서 Sugihara[16]는 단안 비전 센서를 이용하여 최소 3개의 수직 모서리의 방향벡터와 각 모서리 사이의 각도를 알면 로봇의 위치를 추정 할 수 있다는 것을 증명하였다. 일반적인 실내 복도 환경에서 획득 가능한 특징치 중 중요한 것은 수직 모서리이다. 그림 8과 같이 이러한 모서리 정보 중에 센서로부터 3개의 수직 모서리(P_1, P_2, P_3)의 방향벡터 ($\vec{r}_1, \vec{r}_2, \vec{r}_3$)와 각 모서리 사이의 각도 (θ_1, θ_2)를 측정하면 이를 이용하여 로봇위치를 추정할 수 있다. 위치 추정을 위해 사용될 수직 모서리를 찾아내기 위해서는 영상으로부터 추출한 수직 모서리들과 실제 지도상에 존재하는 모서리들을 비교하여 일치하는 것들을 찾아내는 과정이 필요하다. 그림 9에 정리한 바와 같이, 먼저 Dead-reckoning 정보를 기초로 하여 현재의 위치에서 관측되리라 예상되는 지도상의 수직 모서리들을 파악한다. 그리고 카메라를 통해 영상을 획득하고 영상처리를 하여 이미지상의 수직 모서리를 추출해 낸다. 예상되는

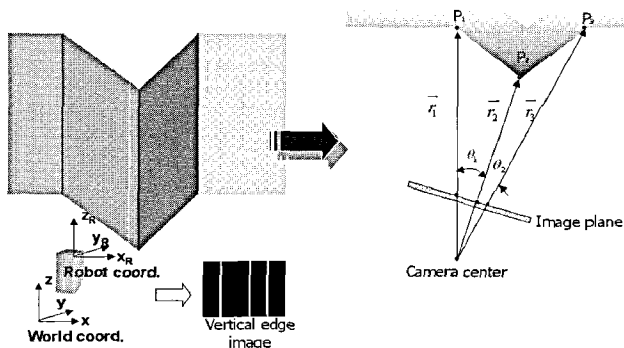


그림 8. 수직 모서리를 이용한 위치 추정.
Fig. 8. Localization with vertical edges.

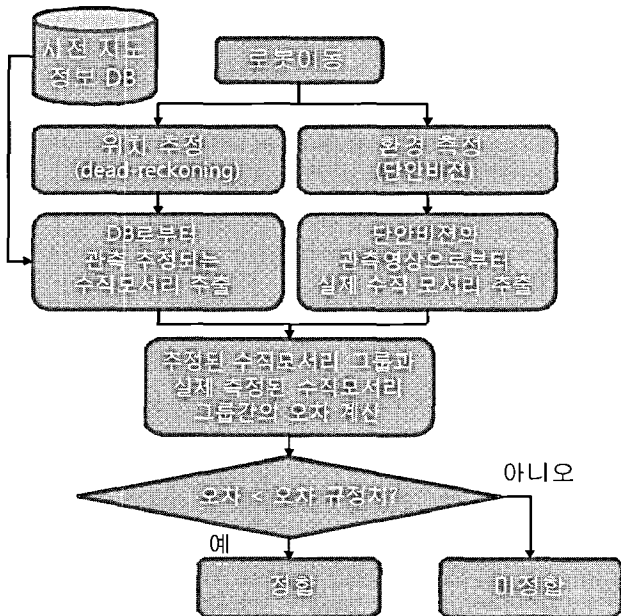


그림 9. 수직 모서리의 일치 방법.
Fig. 9. Corresponding method of vertical edges.

수직 모서리들과 측정된 수직 모서리들과의 차이를 계산하여 그 오차가 일정한 값 이하가 되면 일치가 된 것이다. 그러나 이렇게 일치된 세 점이 주어진다 하더라도 언제나 위치 추정을 성공하는 것이 아니다. 그림 10과 같이 세 점이 서로 다른 두 원을 이루면 위치 추정이 가능하지만 세 점이 한 원 위에 존재한다면 위치 추정을 실패하게 된다.

그림 11은 세 수직모서리의 위치가 주어졌을 때, 측정된 사이각을 이용한 위치추정방법의 흐름도를 도시하고 있다. 그림 10를 참고하여, 수직모서리가 점 P_1 , 점 P_2 , 점 P_3 로 나타난다면, 점 P_1 과 점 P_2 의 사이각 θ_1 , 점 P_2 과 점 P_3 의 사이각 θ_2 이 주어졌을 때 로봇의 위치를 추정하는 방법은 간략히 아래와 같다.

첫째, 점 P_1 과 P_2 를 포함하는 원 C_1 의 방정식과 점 P_2 와 P_3 를 포함하는 원 C_2 의 방정식을 구한다. 점 P_1 과 P_2 와 그 사이각 θ_1 을 이용하여 원 C_1 방정식을 구할 수 있고, 점 P_2 와 P_3 와 그 사이각 θ_2 를 이용하여 원 C_2 의 방정식을 구할 수 있다. 둘째, 두 원의 방정식을 이용하여 두 원의 교점을 지나는 직선AB의 방정식을 구한다. 셋째, 직선의 방정식과 둘 중 하나의 원의 방정식을 이용하면 두 원의 교점을 구할 수 있다. 이렇게 찾은 교점 중에서 주어진 정보인 점 P_2 를 제외한 점이 추정하고자 하는 로봇의 위치이다[16].

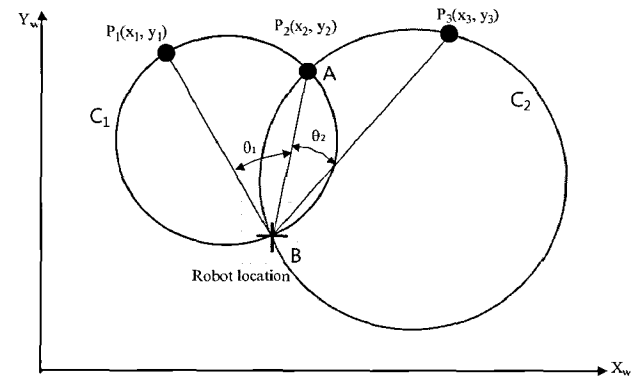


그림 10. 세 수직 모서리를 이용한 위치 추정[16].
Fig. 10. Localization with three vertical edges[16].

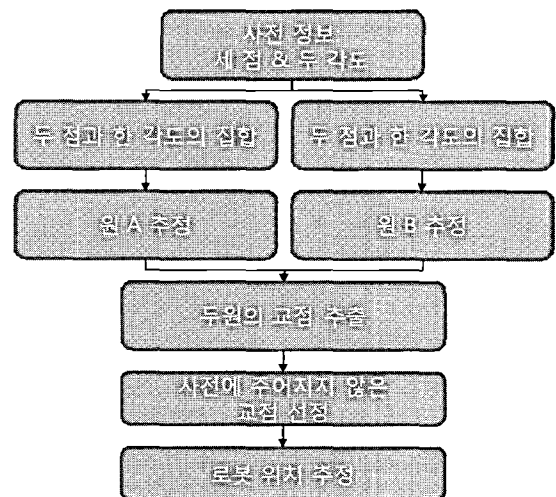


그림 11. 세 수직모서리 기반 위치 추정 흐름도.
Fig. 11. Procedure of localization with vertical edges.

2. 레이저 구조광 센서를 이용한 위치 추정

레이저 구조광 센서를 이용한 위치 추정 방법은 측정된 환경 특징치와 주어진 환경 지도 간의 일치 과정을 통해 이루어진다. 그림 12는 레이저 구조광 센서를 이용하여 모서리 특징치를 획득하는 모습을 보인 것이며, 그림 13은 이렇게 획득된 특징치를 이용하여 이동 로봇의 위치를 추정하는 방법을 설명하는 흐름도이다[5]. 1차로 대응이 가능한 모서리 특징치를 선정하고, 이를 이용하여 대략적인 좌표 변환을 산출한 다음, 현재 파악된 모든 모서리 특징치를 해당하는 좌표변환을 이용하여 모두 좌표 변환한다. 지도에 나타나 있는 모서리의 특징치와 현재 측정된 모서리의 리스트를 정렬한 다음, 지근 거리에 있는 모서리들의 리스트를 정합 후보로 선정하고, 해당 좌표변환을 오차 최소화 방식을 이용하여 최적화 함으로써, 2차 좌표변환 최적화를 수행한다. 구한 좌표 변환치를 이용하여 로봇의 위치를 추정한다.

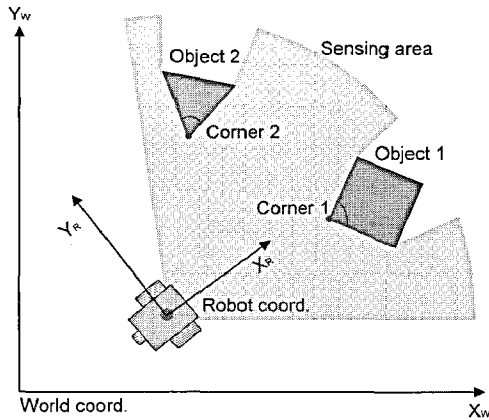


그림 12. 모서리 특징치의 획득.
Fig. 12. Obtaining of corner features.

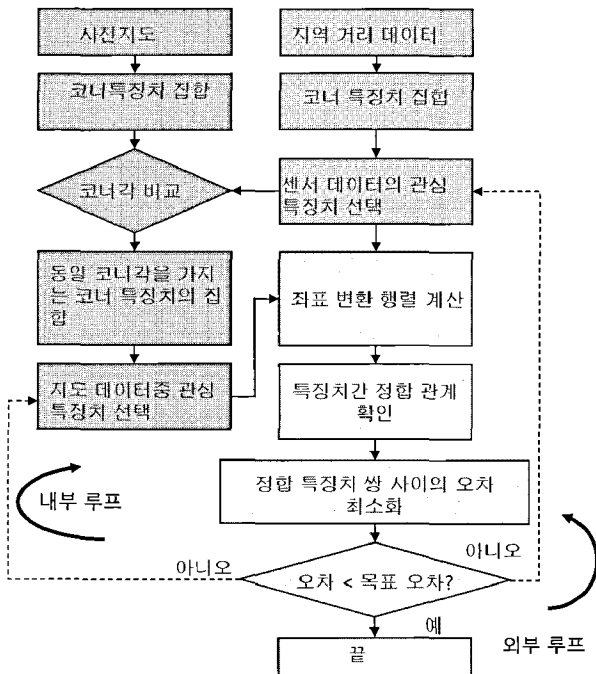


그림 13. 레이저 구조광 센서를 이용한 위치 추정[5].
Fig. 13. Localization by a laser structured light sensor[5].

IV. 센서 정보의 융합

1. 베이시안 정보 융합

베이시안 센서융합 기법은 각 센서들로부터 획득한 위치 추정 정보에 미리 정의한 여러 분포도를 이용하여, 최종적으로 최소 에러를 얻기 위해 각 센서 출력에 분포도를 이용한 신뢰도 지수를 설정하여, 합을 계산하는 방법이다. 즉, 각각의 센서로 획득한 위치 추정 정보에 서로 다른 신뢰도를 고려함으로써 보다 정확하게 위치를 추정하는 방법이다[17,18].

시스템에서 다음과 같은 두개의 센서 신호가 주어졌다고 가정하자. $Z = (Z^1, Z^2)$. 일반적으로 베이시안 센서 융합은 likelihood estimate를 사용하여, 여러 센서의 정보의 혼합으로부터 최적의 H 를 얻어내는 방법이다. Likelihood function은 다음과 같으며, 이의 확률 최대값을 얻게하는 H 를 추정하는 것이 목적이다.

$$p(Z | H) = \prod_{i=1}^2 p(Z^i | H) \tag{1}$$

일반적인 로그(log) 함수는 연속증가 함수 이므로, 식 (1)의 양변에 로그를 취하여, 변환된 로그형태의 식 (2)를 최대값으로 만드는 H 를 추정하는 것이 식 (1)의 likelihood function의 최대값을 만드는 것과 동일하다.

$$L(H) = \log p(Z | H) = \sum_{i=1}^2 \log p(Z^i | H) \tag{2}$$

센서의 출력이 가우시안 확률분포를 따른다고 가정하면, 이때, $p(Z^i | H)$ 는 다음과 같이 정의될 수 있다.

$$p(Z^i | H) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma_i} \exp\left(-\frac{(Z^i - H)^2}{2\sigma_i^2}\right) \tag{3}$$

여기서, σ_i 는 i^{th} 센서의 측정 표준편차이다. 이때, log-likelihood function 는 다음과 같이 정리된다.

$$L(H) = \sum_{i=1}^2 \log p(Z^i | H) = \sum_{i=1}^2 \left(-\frac{1}{2} \log(2\pi \cdot \sigma_i^2) - \frac{1}{2} \frac{(Z^i - H)^2}{\sigma_i^2} \right) \tag{4}$$

위 식을 H 에 대해 미분하면, H 의 최적 추정치를 구할 수 있다. 이때, 베이시안 기법에 근거하는 최적의 추정치는 다음과 같다.

$$\hat{H} = \frac{\sigma_1^{-2} \cdot Z^1 + \sigma_2^{-2} \cdot Z^2}{\sigma_1^{-2} + \sigma_2^{-2}} = \frac{\sum_i \sigma_i^{-2} \cdot Z^i}{\sum_i \sigma_i^{-2}} \tag{5}$$

식 (5)를 일반적인 형태로 해석하면, 추정의 결과가 각 i 번 센서의 출력에 해당 센서의 출력 분포도인 σ_i^2 의 역수를 가중치 상수 형태로 곱하여, 이를 가중 평균한 결과임을 나타낸다. 즉, 분포도가 작은 센서일수록 큰 가중치를 갖게 되어, 출력에 우세한 영향을 미친다.

각 센서의 출력이 곱하여지는 가중치는 다음과 같다.

$$w_i = \frac{\sigma_i^{-2}}{\sum \sigma_i^{-2}} = \frac{A_i}{\sum A_i} \quad (6)$$

여기서, 아래 첨자 i 는 각 센서, A_i 는 각 센서의 신뢰도 지수, 그리고 w_i 는 각 센서의 가중치이다. 센서 신뢰도 지수 A_i 는 각 센서의 분포도 σ_i^2 의 역수에 선형적으로 기여한다고 가정하며, 다음 장에서 두 센서의 신뢰도 지수 A_i 를 실험을 통하여, 정의한다. 이를 이용하여 각 센서로부터 얻어진 위치 추정 결과를 다음과 같이 베이시안 기법으로 계산할 수 있다.

$$x_{robot} = \frac{1}{w_{sum}} \sum_i^n (w_i \times x_i) \quad (7)$$

$$y_{robot} = \frac{1}{w_{sum}} \sum_i^n (w_i \times y_i) \quad (8)$$

$$\theta_{robot} = \frac{1}{w_{sum}} \sum_i^n (w_i \times \theta_i) \quad (9)$$

여기서 $w_{sum} = \sum_i w_i$ 이며, 식 (6)과 같이 w_i 를 정규화하면 1이 된다. x_i, y_i, θ_i 는 각 센서로부터 측정되는 로봇의 위치와 자세를 나타내며, $x_{robot}, y_{robot}, \theta_{robot}$ 은 최종 추정된 로봇의 위치와 자세를 의미한다.

2. 각 센서의 신뢰도 지수

첫째로, 단안 비전을 이용한 위치 추정의 경우, 영상으로부터 추출되는 수직 모서리의 정확도에 최종 로봇 위치 추정 결과의 정확도가 직접적으로 영향을 받는다. 일반적으로 수직모서리의 위치 정확도는 추출되는 수직 모서리의 길이가 중요 변수이다. 수직 모서리의 위치 정확도를 확보 하기 위해, 영상면에서 측정되는 해당 각 수직 모서리의 데이터 양이 충분해야 한다. 즉, 데이터가 충분하다는 것은 이를 이용하여, 해당 수직 모서리의 선형 근사(linear fitting)가 충분한 정확도를 가지기에 용이한 것을 의미한다.

이 논문에서는 수직 모서리의 길이를 세 구간으로 구분하였다. 즉, 세로 방향의 총 p_3 개의 카메라 화소 중, 약 p_2 개 이상의 화소로 이루어진 수직 모서리는 위치추정에 사용되는 환경 특징치인 수직 모서리를 나타내기에 충분하다고 가정하였고, 약 p_1 화소 미만으로 형성된 수직 모서리의 경우에는 수직 모서리를 나타내기에 충분한 정보를 가지고 있지 못하다고 가정하였다. 충분한 정보를 가지지 못할 때, 일치 과정에서 오류가 발생할 가능성이 많아, 결국 위치 추정에서도 오류의 가능성이 높다. 이를 바탕으로, 먼저 신뢰도 지수의 함수 $f(p)$ 를 수직 모서리를 이루는 화소수 p 로 모델링하여 다음과 같이 정의하였다.

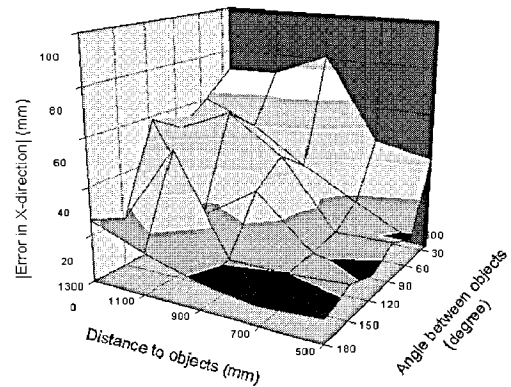
$$f(p) = \sum_{i=0}^3 k_i p^i \quad \text{where} \quad \begin{cases} k_i = 0 \text{ but } k_2 \neq 0 & \text{for } 0 \leq p < p_1 \\ k_i = 0 \text{ but } k_1, k_0 \neq 0 & \text{for } p_1 \leq p < p_2 \\ k_i \neq 0 & \text{for } p_2 \leq p \leq p_3 \end{cases} \quad (10)$$

여기서, $f(p)$ 는 신뢰도 지수의 함수를 나타내며, 간략화를 위해 화소수에 따라 구간을 나누어서 신뢰도 지수 함수의 계수를 정의하였다. 여기서 사용된 각 구간별 함수의 형태는

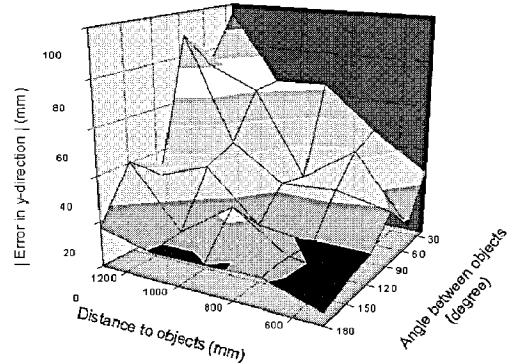
간략화를 위해 선형 3차 함수로 설정하였으며, k_i 는 선형함수의 계수이다. 설계자의 의도에 따라 다양한 함수의 사용이 가능하다. 식 (10)을 통해, 수직모서리를 나타내는 화소가 작을 수록 신뢰도 지수가 감소하도록, 화소가 많을 수록 지수가 증가하도록 설계한다. 위치 추정을 하기 위해 사용한 수직 모서리의 수가 q 개라 한다면, 추정된 위치의 신뢰도 지수를 각 특징치의 신뢰도 함수를 이용하여 다음과 같이 정규화할 수 있다.

$$A_{vision} = \frac{\sum f(p)}{q \cdot p_3} \quad (11)$$

둘째로, 레이저 구조광 센서를 이용한 위치 추정의 경우, 센서의 통계적 분포 특성을 계산하기 위한 신뢰도 지수를 정의하기 위하여, 이동 로봇으로부터 두 물체까지의 거리 d 및 두 물체의 사이각 α 를 변화시켜 가면서 이에 따른 위치 추정 결과를 선 확인하였다(그림 12 참고). 실험 결과, 두 물체의 사이각 α 가 작아질수록, 그리고 두 물체까지의 거리 d 가 커질수록 위치 추정의 오차가 증가한다는 사실을 확인하였다(그림 14). 본 실험을 통해, α 와 d 의 함수로 볼 수 있는, 각 방향의 위치 추정 오차의 분산 $Var_x(\alpha, d), Var_y(\alpha, d)$ 를 곡면 모델링하였다. 모델결과를 이용하여 실제 입력되는 α 와 d 에 대해, 레이저 구조광 센서를 이용한 위치추정의 신뢰도 지수 A_{laser} 를 아래와 같이 정의하였고, 정규화(normalization) 하였다.



(a) X방향 위치 추정오차 특성



(b) Y방향 위치 추정오차 특성

그림 14. 레이저 구조광 센서 위치 추정오차 실험.
Fig. 14. Results of the localization error analysis by using laser structured light sensor.

$$A_{laser} = \frac{1}{Var(\alpha, d) + 1} \quad (12)$$

즉, 분모에 위치한 위치 추정 오차의 분산(Var)이 증가하면 레이저 구조광 센서의 신뢰도 지수 A_{laser} 는 감소하고, 위치 추정 오차의 분산(Var)이 감소하면 레이저 구조광 센서의 신뢰도 지수 A_{laser} 는 증가하는 형태를 보이며, 위치 추정 오차의 분산(Var)이 0인 경우, 신뢰도 지수 A_{laser} 가 1이 된다는 것을 직관적으로 확인할 수 있다. 따라서 위의 식은 레이저 구조광 센서를 통해 얻은 결과의 신뢰도를 표현하는 신뢰도 지수로서 적합한 형태이다.

이렇게 구한 신뢰도 지수 A_{vision} 와 A_{laser} 는 센서 정보의 융합 과정에서 각 센서의 통계적 분포 특성을 결정하는 데 사용된다. 또한, 각각의 단일 센서의 실내 조명의 변화에 대한 특성을 조사하기 위해, 조명변화에 따른 위치 추정에 대한 실험을 수행하였다. 실험 환경이 일반적인 실내 조명으로서 카메라 영상을 획득하여 환경 특징치를 추출하는 데 이상이 없는 조명 조건 하에서는 이동 로봇의 위치를 추정하기에 충분한 환경 특징치가 추출되어 위치 추정에 성공하였다. 그러나 실험 환경이 어느 정도 어두워져 카메라로 획득한 영상으로부터 환경 특징치를 추출하는 데 어려움이 있거나 추출되는 환경 특징치의 수가 적은 경우에는 이동 로봇의 위치를 추정할 수 없었다. 레이저 구조광 센서를 이용하여 환경 정보를 획득하는 경우에는 일반 적인 실내 조명의 경우이거나 어두운 경우 모두 환경 특징치를 획득하는 데에는 문제가 없었기 때문에 이동 로봇의 위치 추정에는 대부분의 경우 조명 변화에 대한 문제가 없었다. 이는 레이저 구조광 센서가 외부 광원에 전적으로 의존하는 수동 센서인 카메라와는 달리 센서 시스템 자체가 광원을 가지고 환경에 주사하는 능동 센서이므로 외부 광원이 충분하지 못한 어두운 경우에도 환경 인식에 문제가 없기 때문이다.

3. 센서 운용 방안

본 연구에서 센서 정보의 융합 방법은 크게 두 가지 단계로 나누어 질 수 있다. 첫번째 단계는 조명 상황의 변화에 따라 사용될 센서의 선택과 그 방법에 관한 단계이고, 두 번째는 조명에 의하여 나뉘어진 상황 중에서 정상적인 조명 환경에서의 센서 정보의 융합 단계이다.

먼저 카메라를 이용하여 획득한 환경에 대한 영상의 히스토그램의 평균값을 기준으로 하여 환경의 조명 상태를 세 개의 구간으로 나눈다. 히스토그램 밴드의 범위가 t_1 인 구간에서는 카메라를 이용하여 획득한 영상으로부터 위치 추정에 필요한 수직 모서리에 대한 정보를 거의 추출할 수 없을 정도로 어둡기 때문에 단지 레이저 구조광 센서의 정보만을 가지고 위치 추정을 수행할 수 있다. 히스토그램 밴드의 범위가 t_1 과 t_2 사이인 구간에서는 수직 방향의 윤곽선이 어느 정도 추출되기 시작하지만 그 수가 적고, 잡음이나 어두운 영상으로 인한 정보의 부족 등에 의해 부정확한 예지가 추출될 가능성이 높은 등 신뢰도가 낮은 구간에서 추출된 환경 특징치이므로 레이저 구조광 센서에 의한 위치 추정 결과와 동등한 자격으로 융합되지 않고, 카메라에 의한 위치 추정 결과에는 낮은 비율을 적용하고 레이저 구조광 센서에 의한 위치 추정 결과에는 높은 비율을 적용하여 융합을 한다. 히스토그

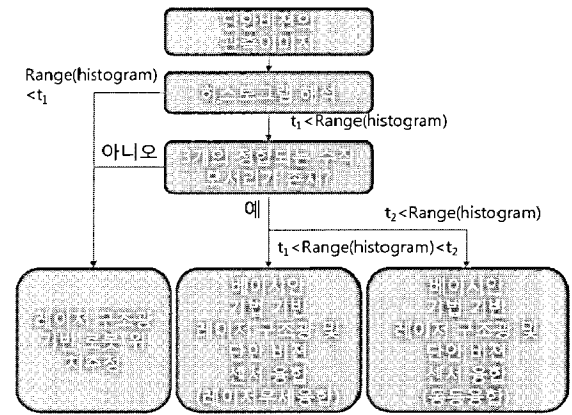


그림 15. 조명 상태를 기준으로 한 위치 추정 방법.

Fig. 15. Localization method by sensor fusion.

램 밴드의 범위가 t_2 이상인 구간에서는 충분한 수의 수직 모서리가 추출되기 때문에 베이지안 센서융합 방법으로 센서 정보를 융합할 수 있다. 대상 환경의 조명 상태를 기준으로 한 위치 추정 방법이 그림 15에 나타나 있다.

V. 위치 추정 실험

제안된 센서 융합 기법의 타당성을 확인하기 위하여 세가지 이동 로봇의 위치 추정 실험을 수행하였다. 여기서 단안 비전 센서를 이용한 위치추정의 신뢰도 지수 A_{vision} 는 센서정보 융합 시 단안 비전 센서의 통계적 분포 특성을 추정하기 위하여 사용되고, 실험에서는 p_2 는 약 200화소, 그리고 p_1 은 50-100 화소를 사용하였다. 센서 운용을 위해, 8bit의 영상밝기 범위에서 t_2 는 약 100으로, t_1 은 약 50으로 설정하였다.

1. 실험I: 센서 융합을 이용한 위치 추정 실험

먼저 정상 조명하에 다면체로 구성된 실내 환경에서 위치 추정 실험을 수행하였다. 이동 로봇의 위치는 $y = 0mm$, $\theta = 0^\circ$ 으로 고정하고 x 를 0, 900, 1800, 2700, 3600, 4500,

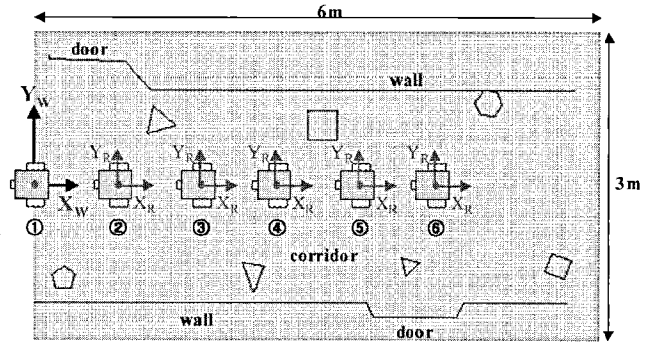


그림 16. 이동 로봇의 위치와 환경 지도 (정상조명).

Fig. 16. Environment for the Experiment I.

표 3. 위치 추정 오차의 평균과 표준 편차.

Table 3. Average and the standard deviation of the error.

	오차의 평균			오차의 표준 편차		
	X(mm)	Y(mm)	θ (°)	X(mm)	Y(mm)	θ (°)
Laser	58.0	-3.7	-0.2	42.4	57.4	2.3
Camera	35.7	-14.5	-0.6	41.6	70.8	2.9
Fusion	40.9	-11.5	-0.4	27.1	41.7	1.6

5400mm로 변화시켰다(그림 16).

각 지점에서 센서 융합을 이용한 경우가 각각의 단일 센서를 이용한 경우보다 위치 추정 오차가 작게 유지됨을 알 수 있다(그림 17). 위치 추정 오차의 평균과 표준 편차를 정리한 표 2을 보면 센서 융합의 유용성을 더 정확하게 확인할 수 있다(그림 17(c) 참고). 센서 융합의 결과가 단일 센서에 의한 위치 추정의 결과 보다 오차의 분포(즉 오차의 평균 및 오차의 표준편차) 관점에서, 오차 타원이 적게 나타난 것을 확인할 수 있다. 이는 센서 융합을 통하여 환경 측정에 대한 불확실성을 줄이고 동시에 위치 추정에 대한 신뢰도를 높임으로써 보다 정확하게 이동로봇의 위치를 추정하였다는 것을 보이는 결과이다.

2. 실험II: 조명 변화가 위치 추정에 미치는 영향

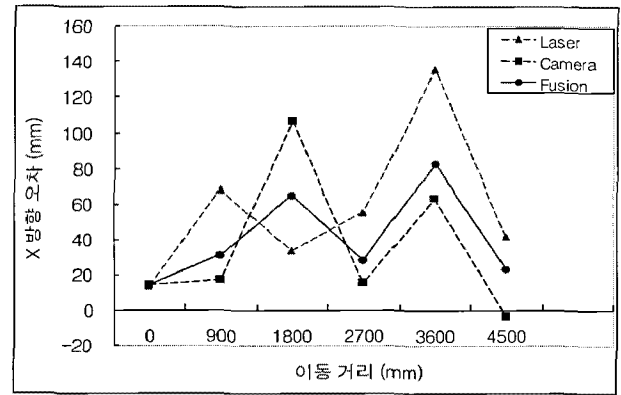
조명의 변화가 이동 로봇의 위치 추정에 어떠한 영향을 미치는지 알아보기 위한 실험을 수행하였다. 그림 16에 나타난 실험 환경에서 ①, ②, ⑥번 지점에서는 정상 조명으로 실험을 수행하고 ③, ④, ⑤번 지점에서는 전체 실내 조명을 소등하고 에지 추출이 불가능할 정도로 실험 환경을 어둡게 하여 실험을 수행하였다. 대상 환경이 어두운 ③, ④, ⑤번 지점에서는 카메라로 획득한 영상으로부터 특징치 추출이 어려우나 레이저 구조광 센서도 병용하였기 때문에 레인지 정보를 이용하여 이동 로봇의 위치를 추정할 수 있었다(그림 18). 만약 단안 비전(monocular vision)이나 양안 비전(stereo vision), 또는 삼안 비전(trinocular vision) 시스템 등 일반 카메라만으로 구성된 센서 시스템을 가지고 있는 이동 로봇이었다면 위치 추정에 실패가 예상되나, 본 시스템은 능동 센서인 레이저 구조광 센서를 수동 센서인 카메라와 병용하고 있기 때문에 환경이 어두워져어도 위치 추정에 성공할 수 있었다.

3. 실험III: 미지의 물체가 위치 추정에 미치는 영향

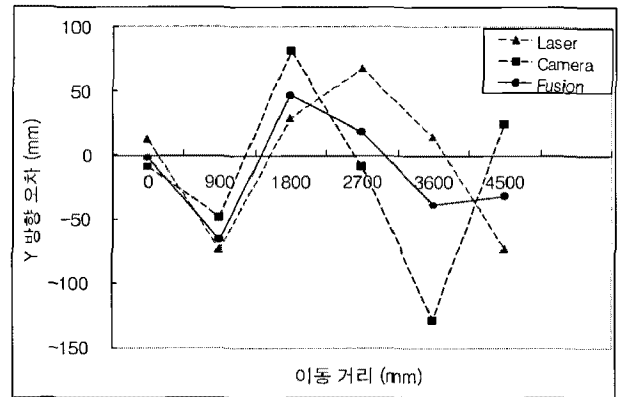
이동 로봇이 주행하는 환경에는 지도 정보에는 포함되지 않은 미지의 물체들이 있게 마련이다. 그래서, 이러한 물체들이 환경 내에 존재할 때, 센서의 정보의 융합과 위치 추정에 어떠한 영향을 주는지 확인하는 실험을 수행하였다.

그림 19는 환경 지도에 미지의 물체인 의자(chair)와 물통(bucket)이 놓인 위치를 표시한 것이다. 조명은 정상적으로 유지하면서 물체4의 앞에는 물통을, 물체5의 앞에는 의자를 위치시키고 센서 융합에 의한 위치 추정 실험을 수행하였다.

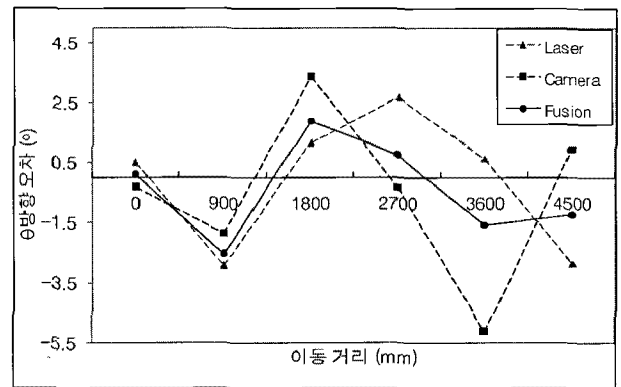
그림 20에 보인 바와 같이, ③, ④, ⑤번 지점에서 레이저 구조광 센서의 측정 영역 내의 미지의 물체에 의한 대상 환경의 가림에 의하여 충분한 모서리 특징치를 추출할 수 없는 경우에는 레이저 구조광 센서를 이용하여 이동 로봇의 위치를 추정할 수 없었다. 하지만, 이 경우에도 주행환경의 주변 광이 충분한 경우, 카메라는 상대적으로 더 먼 영역을 측정 가능하기 때문에 가까이 가려진 물체 이외에서라도 3개 이상의 수직 방향 모서리를 추출할 수 있어서 카메라에 의한 위치 추정이 가능하였다. 결과적으로 레이저 구조광 센서만을 사용하여 위치 추정을 하였다면 ③, ④, ⑤번 지점에서 위치 추정에 실패하였겠지만, 이와 같은 단점을 보완하기 위한 카메라를 또한 사용하여 다중 센서에 의한 센서 융합을 하였기 때문에 여전히 이동 로봇의 위치를 추정할 수 있음을 확인할 수 있었다.



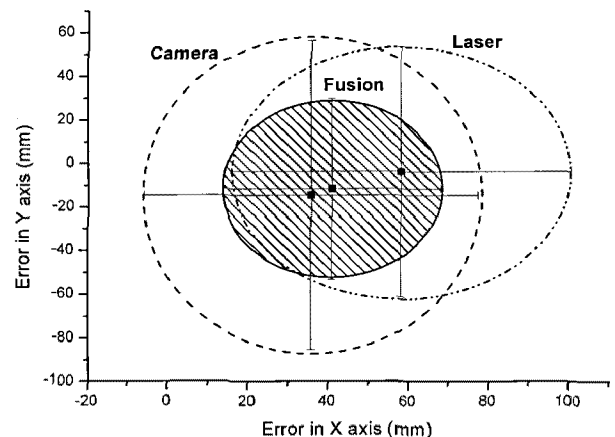
(a) X방향의 위치 추정 오차



(b) Y방향의 위치 추정 오차

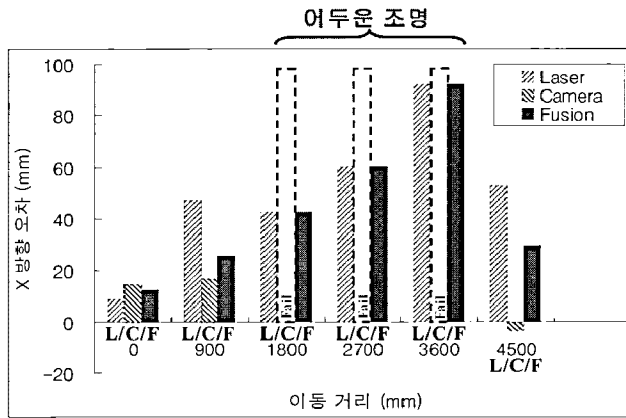


(c) θ방향의 위치 추정 오차

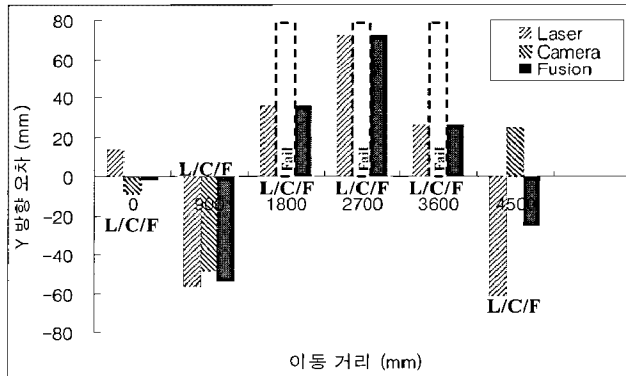


(d) XY위치 오차 타원 (표 2 참조)

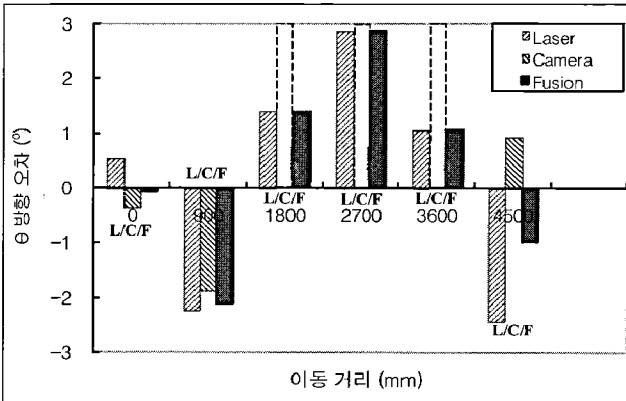
그림 17. 이동 로봇의 위치 추정 오차 (정상 조명).
Fig. 17. Localization error of the Experiment I.



(a) X방향의 위치 추정 오차

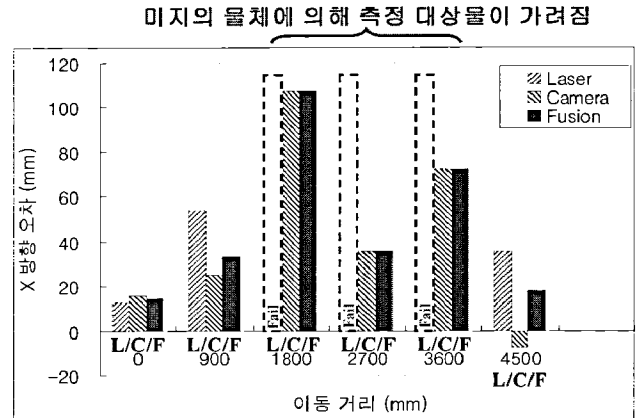


(b) Y방향의 위치 추정 오차

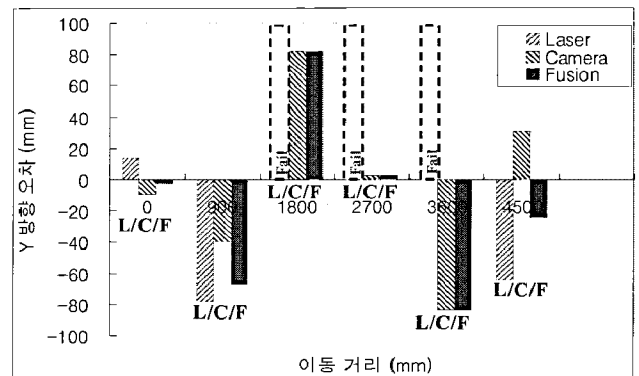


(c) θ 방향의 위치 추정 오차

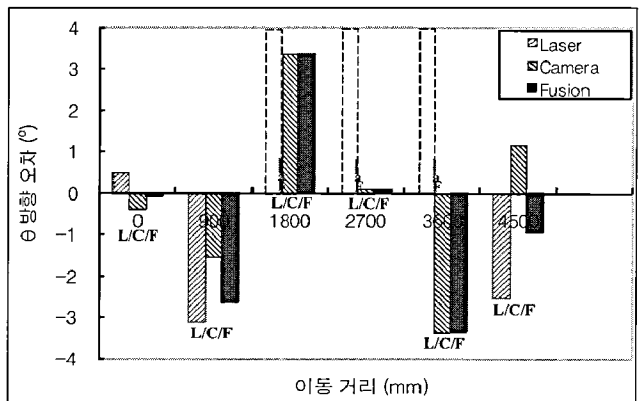
그림 18. 조명 변화에 따른 위치 추정 오차.
Fig. 18. Localization error of the Experiment II.



(a) X방향의 위치 추정 오차



(b) Y방향의 위치 추정 오차



(c) θ 방향의 위치 추정 오차

그림 20. 미지의 물체 추가 경우 위치 추정 오차.
Fig. 20. Localization error of the Experiment III.

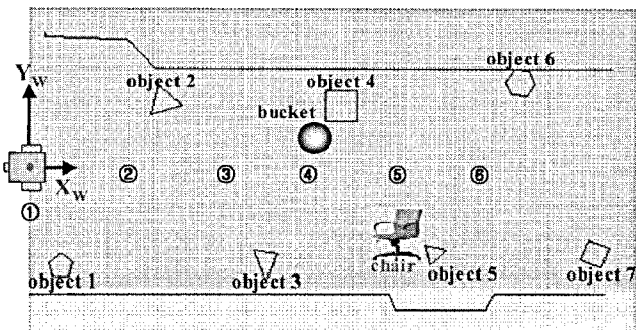


그림 19. 미지의 물체에 관한 실험을 위한 실험환경.
Fig. 19. Environment for the Experiment III.

VI. 결론

본 연구에서는 단안 비전과 레이저 구조광 센서를 융합하여, 모서리와 수직벽이 많이 관찰되는 실내 환경에서 이동 로봇의 위치 추정을 수행하였다. 단안 비전을 이용하여 추출된 수직 모서리와 레이저 구조광 센서를 이용하여 획득한 모서리 특징치와 직선 특징치를 이용하여 위치를 추정하였으며, 각 센서들의 위치 추정 영향 요인을 확인하여, 센서 정보 융합시 가중치로 사용되는 센서 신뢰도 지수를 설계하였다. 환경의 밝기 정도를 나타내는 단안 비전 획득영상의 히스토그램 해석을 통해 대상 환경의 조명 상태에 따른 센서 정보 융합 방안을 제시하였고, 정상 조명 하에서 센서의 통계적 특

성에 기반한 베이시안 기법을 이용하여 센서 정보를 융합하는 방법에 대하여 제안하였다. 실험을 통한 결론은 다음과 같다.

- 제한한 센서 융합 기반 추정한 위치 오차의 오차 타원이 단일 센서를 이용하여 추정된 위치 오차의 오차타원보다 감소함을 확인하여, 위치 추정에 대한 불확실성을 줄이고, 신뢰도를 높이는 결과를 보였다.
- 환경 조명 조건을 변화시켜 센서 융합의 유용성을 확인하였다. 저조도 경우, 단안 비전이 위치추정에 실패하나, 레이저 구조광 센서의 위치 추정 결과를 이용하면 이동 로봇의 위치를 추정할 수 있었다.
- 지도에 등록되어 있지 않은 미지의 물체가 측정 대상물을 가려 레이저 구조광 센서로는 위치를 추정할 수 없는 경우, 측정 영역이 보다 넓은 단안 비전을 이용하여 충분한 수직 모서리를 추출할 수 있었고, 이동 로봇의 위치를 추정할 수 있다는 것을 확인하였다.

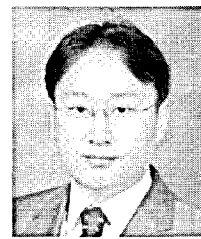
본 연구를 통하여, 이동 로봇이 위치 추정을 함에 있어 다중 센서의 정보를 융합하여 대상 환경의 조명 변화에 적응성이 있는 시스템을 구현하였다.

참고문헌

- [1] H. J. Sohn and B. K. Kim, "A robust localization algorithm for mobile robots with laser range finders," *Proc. of 2005 IEEE ICRA*, pp. 3545 - 3550, 2005.
- [2] D. Brscic and H. Hashimoto, "Model based robot localization using onboard and distributed laser range finders," *Proc. of 2008 IEEE/RSJ/ROSL*, pp. 1154-1159, 2008.
- [3] D. M. Cole and P. M. Newman, "Using laser range data for 3D SLAM in outdoor environments," *Proc. of 2006 IEEE ICRA*, pp. 1556-1563, 2006.
- [4] M. Jung, H. Myung, H. Lee, and S. Bang, "Ambiguity resolving in structured light 2D range finder for SLAM operation for home robot applications," *Proc. of 2005 IEEE Workshop on Advanced Robotics and its Social Impacts*, pp. 18-23, 2005.
- [5] 김민근, 레이저 비전 센서를 이용한 순차적인 자율 지도 작성과 자기 위치 추정 기반의 이동로봇 주행 방법, 석사 학위 논문, 기계공학과, 한국과학기술원, 2003.
- [6] M. H. Kim, S. C. Lee, and K. H. Lee, "Self-localization of mobile robot with single camera in corridor environment," *Proc. of 2001 IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, vol. 3, pp. 12-16, 2001.
- [7] M. Zaman, "High precision relative localization using a single camera," *Proc. of 2007 IEEE ICRA*, pp. 3908-3914, 2007.
- [8] A. J. Davison, I. D. Reid, N. D. Molton, and O. Stasse, "Mono SLAM: Real-Time Single Camera SLAM," *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 29, no. 6, pp. 1052-1067, 2007.
- [9] O. Wijk and H. I. Christensen, "Localization and navigation of a mobile robot using natural point landmarks extracted from sonar data," *Robotics and Autonomous Systems*, 31, pp. 31-42, 2000.
- [10] H. Kim, J. Choi, and M. Park, "Indoor localization system using multi-modulation of ultrasonic sensors and digital compass," *Proc. of 2008 IEEE/RSJ/ROSL*, pp. 1359-1364, 2008.
- [11] A. Burguera, G. Oliver, and J. D. Tardos, "Robust scan matching localization using ultrasonic range finders," *Proc. of 2005*

IEEE/RSJ/ROSL, pp. 1367-1372, 2005.

- [12] K. O. Arras and N. Tomatis, "Improving robustness and precision in mobile robot localization by using laser range finding and monocular vision," *Proc. of 3rd European Workshop on Advanced Mobile Robots*, pp. 177-185, 6-8, September 1999.
- [13] 채수용, 센서융합을 이용한 실내주행 이동로봇의 위치 추정 정확도 개선, 석사 학위 논문, 전기 및 전자공학과, 한국과학기술원, 2000.
- [14] A. Diosi and L. Kleeman, "Advanced sonar and laser range finder fusion for simultaneous localization and mapping," *Proc. of 2004 IEEE/RSJ/ROSL*, pp. 1854-1859, 2004.
- [15] K. O. Arras, N. Tomatis, B. T. Jensen, and R. Siegwart, "Multisensor on-the-fly localization: Precision and reliability for applications," *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 34, no. 2-3, pp. 131-143, 2001.
- [16] K. Sugihara, "Some location problems for robot navigation using a single camera," *Computer vision, graphics, and image processing* 42, pp. 112-129, 1988.
- [17] L. A. Klein, *Sensor and Data Fusion: A Tool for Information Assessment and Decision Making*, vol. PM138, SPIE Publications, 2004.
- [18] J. K. Hackett and M. Shah, "Multi-sensor fusion: a perspective," *Proc. of IEEE Int. Conf. Robotics and Automation*, pp. 1324-1330, 1990.



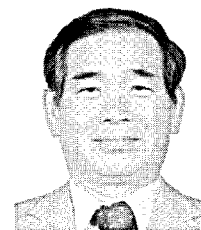
김민영

1996년 한국과학기술원 기계공학과(학사). 1998년 한국과학기술원 기계공학과(석사). 2004년 한국과학기술원 기계공학과(박사). 2009년~현재 경북대학교 전자전기컴퓨터학부 전임강사. 관심분야는 로봇 시각지능, 지능로봇 시스템, 위치인식 및 지도 작성, 광기전 복합시스템, 반도체 검사장비.



안상태

1999년 호주 RMIT대학교 기계공학과(Associate Diploma). 2002년 한양대학교 기계공학과(학사). 2004년 한국과학기술원 기계공학과(석사). 2004년~현재 국방과학연구소 연구원. 관심분야는 이동로봇, 머신 비전, 무기체계, 국방로봇.



조형석

1971년 서울대학교 공과대학(학사). 1973년 Northwestern University 기계공학과(석사). 1977년 University of California at Berkeley 기계공학과(박사). 1978년~현재 한국과학기술원 기계공학과 교수. 현재 International Journal of Optomechatronics 편집장. 관심분야는 광메카트로닉스, 지능비전 시스템, 로보틱스, 적응광학 시스템, 광센서 및 광계측.