

단일 카메라를 이용한 이동 로봇의 실시간 위치 추정 및 지도 작성에 관한 연구

A Study on Real-Time Localization and Map Building of Mobile Robot using Monocular Camera

정 대 섭*, 최 종 훈**, 장 철 응**, 장 문 석***, 공 정 식****, 이 응 혁*****, 심 재 홍*****
Dae-Seop Jung, Jong-Hoon Choi, Chul-Woong Jang, Mun-Suk Jang, Jung-Shik Kong
Eung-Hyuk Lee, Jae-Hong Shim

Abstract - The most important factor of mobile robot is to build a map for surrounding environment and estimate its localization. This paper proposes a real-time localization and map building method through 3-D reconstruction using scale invariant feature from monocular camera. Mobile robot attached monocular camera looking wall extracts scale invariant features in each image using SIFT(Scale Invariant Feature Transform) as it follows wall. Matching is carried out by the extracted features and matching feature map that is transformed into absolute coordinates using 3-D reconstruction of point and geometrical analysis of surrounding environment build, and store it map database. After finished feature map building, the robot finds some points matched with previous feature map and find its pose by affine parameter in real time. Position error of the proposed method was maximum. 8cm and angle error was within 10°.

Key Words : Monocular Camera, Mobile Robot, SIFT, Map Building, Real-Time Localization

1. 서론

이동 로봇의 절대적 위치 추정은 특징점의 위치와 측정값들을 이용하여 로봇의 위치를 구하는 문제이다. 반면 이동 로봇을 이용한 지도 작성의 문제는 로봇의 위치와 측정값들을 이용하여 특징점의 위치를 구하는 문제이다. 이동로봇의 위치 추정을 위해서는 정확한 특징점의 위치 정보가 필요하다. 그리고 위치 정보를 로봇 스스로 얻기 위해서는 정확한 로봇의 위치 정보가 필요하기 때문에 이 두 가지를 동시에 수행하는 것은 간단하지 않다. 이와 같은 문제를 해결하기 위해 SLAM(Simultaneous Localization And Map Building)이라는 기법이 도입되고 있다. SLAM은 Smith[1]에 의해 처음 논의 되었으며 Durrant-Whyte[2]가 기본적인 틀을 마련하였다.

SLAM을 구현하기 위한 센서로는 초음파, 레이저, 영상센서가 주로 이용된다. 초음파는 가격이 저렴하고 속도가 빠른 반면에 정보량이 제한적이고 물체가 관측된 방향 정보가 모호하며, 레이저의 경우 능동적이고 정확하나 속도면에서 느리다. 요즘 가장 많이 연구되고 있는 영상 센서는 저가 이면서 고성능을 낼 수가 있다. 영상 센서로는 양안 카메라(Stereo Camera)와 단안 카메라(Monocular Camera)가 있는데, 양안 카메라를 이용하는 방법은 많은 비용과 환경 변수의 영향에 민감하고, 단안 카메라를 이용하는 방법은 계산 복잡도와 오

차가 크다는 단점이 있다. 그러나 단안 카메라는 알고리즘 개선으로 단점을 줄일 수 있다.

본 논문에서는 단안 카메라를 사용하여 이동 로봇의 실시간 위치 추정 및 맵 빌딩을 하기 위한 알고리즘을 제안한다. 단일 카메라가 벽면을 바라보도록 부착된 이동 로봇이 벽면 주종을 하면서 영상을 획득하고, 이 영상들을 처리하여 기하학적인 해석으로 피쳐 맵(Feature Map)을 작성한다. 피쳐 맵 작성을 마친 이동 로봇은 임의의 위치에서 주행을 하면서 실시간으로 위치 오차 10cm, 각도 오차 10도 이내의 범위로 자기 위치 인식 하는 것을 구현 하였다.

2. 스케일 불변 특징의 검출 및 매칭

특징점 검출을 위한 방식으로는 Harris-Laplace 방식과 가우시안 차분(DoG : Difference of Gaussian) 방법이 있는데 전자는 정확도 면에서 장점을 가지고 있으며 후자는 속도면에서 장점을 가지고 있다. 그러나 지능 로봇의 위치 추정은 정확도와 속도를 모두 고려해야 하므로, 스케일 변환, 회전, 조명의 변화에 따른 성능을 비교 분석 한 결과 가우시안 차분이 방법이 더 우수한 것으로 알려져 있다[3]. Lowe는 가우시안 차분 영상을 이용하여 특징점을 검출하기 위해 SIFT(Scale Invariant Features Transform) 변환을 이용 하였다[4].

SIFT 알고리즘을 이용한 특징점 검출 단계는 4단계로 구성되어 있다[4,5].

① Scale-Space extrema detection
: 가우시안 차분(DoG)을 이용하여 모든 스케일과 영상 위치에 대해 수행하고, 스케일 방향에 대해 불변할 가능성이 있는 후보점(Candidate Point)들을 구한다.

② Keypoint localization

저자 소개

- * 한국산업기술대학교 메카트로닉스공학과 석사과정
- ** 한국산업기술대학교 전자공학과 석사과정
- *** 인하대학교 전자공학과 박사과정
- **** 지능형 웰스케이 시스템 연구소 공학박사
- ***** 한국산업기술대학교 전자공학과 교수
- ***** 한국산업기술대학교 메카트로닉스공학과 교수

: 단계①에서 구한 후보점들을 위치와 스케일, 명암에 대해 안정도를 판단하여 키포인트를 구한다.

③ Orientation assignment

: 각각의 키포인트 위치에 국부 영상 특성에 준하여 방향을 구한다.

④ Keypoint descriptor

: 각각의 키포인트 주위의 국부 영역에서 국부 영상 변화를 구한다.

가우시안 차분을 이용하여 극대, 극소점을 구하게 되는데, 이 점들은 명암(Contrast)과 주요 곡률(Principle curvature)에 대해 민감하기 때문에 제거 되어야 한다. 제거된 극대, 극소점들은 특징점이 되어, 각각의 특징점들을 국부 영상 특성에 준하여 방향을 구하고, 방향을 이용하여 각각의 특징점마다 특징벡터를 구성한다. 이렇게 해서 구해진 각각의 점에 대해 좌표 x, y , 스케일, 방향, 128개의 서술자(descriptor)를 저장한다. 그리고 매칭시에는 이 값들을 비교하여 매칭을 수행한다.

3. 실시간 위치 추정 및 지도 작성

3.1 지도 작성

그림 1(a)는 지도를 작성할 경우 작업공간에서 로봇과 획득한 영상과의 좌표 관계를 나타낸다. 로봇의 지도 작성 공간에 대한 좌표계 즉, 실세계 좌표계는 바닥 공간이 수평이라는 가정 하에, 바닥면은 (X, Y)좌표이며 높이는 Z좌표가 된다. 그러나 영상을 기준으로 할 경우 한 프레임에서의 평면 좌표는 (X, Y)좌표이며 영상과 로봇과의 거리는 Z좌표가 된다. 그리고 l 은 두 프레임 간의 거리이고, $d1$ 은 카메라와 프레임과의 거리이며, $d2$ 는 로봇의 위치와 특징점과의 거리를 의미한다. 그림1(b)은 로봇의 주행방위와 카메라의 위치 관계를 나타낸다.

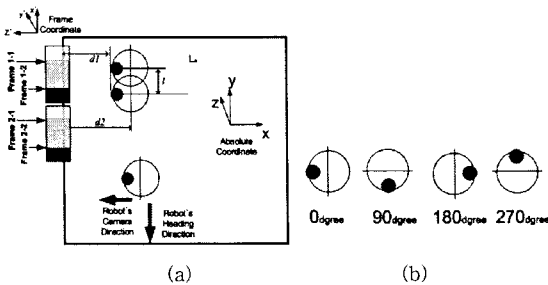


그림 1. (a)로봇의 실세계 좌표계와 획득 영상 좌표계의 관계. (b)이동 로봇의 주행 방위와 카메라 위치관계.

프레임에서 추출된 특징점의 상대 좌표는 지도 작성을 위하여 작업 공간의 절대 좌표로 변환해야 한다. 식 (1)을 이용하여 로봇의 진행 방향에 따라 4분면으로 구분하여 특징점들을 로봇의 작업 공간에 대한 절대좌표계로 변환 하였다.

여기서 (x, y) 는 로봇의 지도 작성 공간의 특징점 절대좌표이며 $(Robot_x, Robot_y)$ 는 프레임을 획득할 때 로봇의 위치이다. 그리고 (t_x, t_y) 는 계산된 특징점의 상대 위치이다.

$$\begin{aligned}
 0^\circ &\leq \begin{matrix} x = Robot_x - t_x \\ y = Robot_y + t_y \end{matrix} < 90^\circ \\
 90^\circ &\leq \begin{matrix} x = Robot_x + t_x \\ y = Robot_y + t_y \end{matrix} < 180^\circ \\
 180^\circ &\leq \begin{matrix} x = Robot_x + t_x \\ y = Robot_y - t_x \end{matrix} < 270^\circ \\
 270^\circ &\leq \begin{matrix} x = Robot_x - t_x \\ y = Robot_y - t_x \end{matrix} < 360^\circ
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

3.2 실시간 위치 추정

피쳐맵 작성이 완료된 로봇의 작업 공간은 자연 랜드마크가 형성된 것과 같다. 즉, 로봇이 목적지로 이동시 기본적인 엔코더나 거리 검출 센서에 의하여 위치 인식 및 장애물 회피를 하면서 주행도중 vision에 의해 검출된 특징점에 의해 로봇의 자세를 보정할 수 있게 된다. 로봇이 주행하면서 실시간 위치 추정을 하기 위해 일정 간격의 두 영상 프레임의 특징점을 구하고 매칭을 통하여 특징점을 찾는다. 입력 영상의 특징점 R_k 과 피쳐맵 상의 특징점 F_k 을 매칭을 통하여 최종 특징점을 검출한다. 이때 R_k 에 매칭된 특징점을 \tilde{R}_k , F_k 에 매칭된 점을 \tilde{F}_k 라 한다. \tilde{R}_k 과 \tilde{F}_k 는 동일한 특징점으로 두 특징점들의 상대좌표에 의해서 어파인(Affine) 변형 파라미터를 구할 수 있게 된다.

\tilde{R}_k 의 상대 좌표를 (X_R, Y_R, Z_R) , \tilde{F}_k 의 상대좌표를 (X_F, Y_F, Z_F) 이라 하면 두 특징점들은 로봇이 실내 환경에서 평면 주행을 하기 때문에 식 (2)를 만족하게 된다.

$$\begin{bmatrix} X_F \\ Y_F \\ Z_F \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) \\ \sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_R \\ Y_R \\ Z_R \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} t_x \\ t_y \end{bmatrix}
 \tag{2}$$

이동 로봇이 임의의 위치에서 적어도 2개 이상의 매칭이 되는 점을 갖는다면 식 (2)를 연립해서 실시간으로 (t_x, t_y, θ) 을 구할 수 있다. 이렇게 해서 구한 (t_x, t_y, θ) 은 피쳐맵의 상대 위치에 대응하는 로봇의 상대위치가 된다.

4. 실험 및 결과

4.1 거리 검출 실험

그림 3과 같이 거리 검출 실험은 전방의 물체에 대한 거리에 따른 정확도를 구하기 위해 전방에 18cm 차이거나 두 개의 물체를 60cm에서 210cm 까지 30cm 간격으로 특징점을 검출하여 거리 오차를 구했다. 그림 2는 매 거리마다 10번씩 수행하여 거리 오차를 평균으로 계산하여 나타내었고, 로봇과 물체와의 거리가 60cm ~ 90cm 사이의 거리 오차가 가장 적

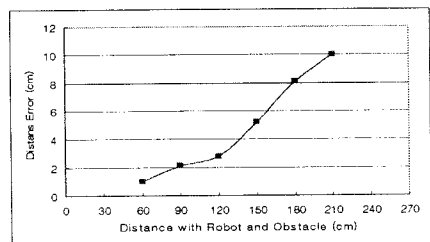


그림 2. 로봇과 물체와의 거리에 의한 오차.

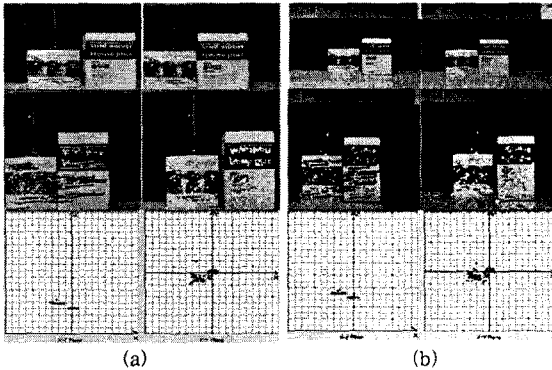


그림 3. 물체의 특징점 추출 및 상대 위치 계산.
(a)전방 90cm. (b)전방 120cm.

은 것을 알 수 있다. 그래서 로봇이 벽면과 80cm 간격으로 떨어져 벽면 주행을 하며 피쳐맵을 작성 하였다.

4.2 피쳐맵 작성 및 실시간 위치 추정

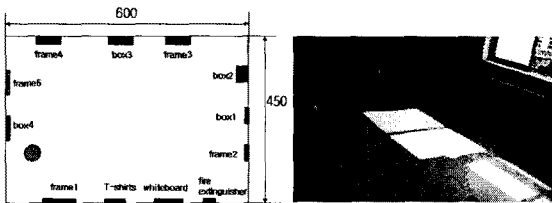


그림 4. 지도 작성을 위한 실험 환경.

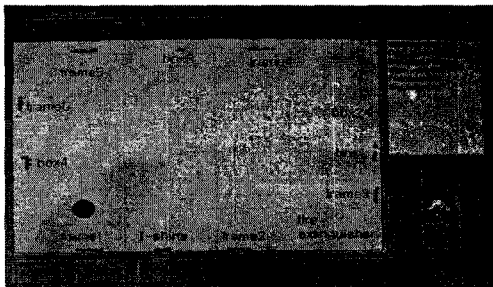


그림 5. 이동 로봇의 갠신된 피쳐맵.

그림 4은 피쳐맵 작성을 위한 600×450의 실험 환경이고, 벽면에는 특징물(옷, 소화기, 액자, 박스)을 배치 하였고, 그림 5는 이동 로봇에서 갠신된 피쳐맵을 나타내고 있다. 그림 4과 그림 5를 비교해 보면 실제 환경과 비슷한 위치에 특징물에 배치되어 있음을 확인할 수 있다.

표 1은 실제 환경에서 배치된 특징물의 중심점의 절대 좌표와 피쳐맵에서 특징물의 중심점의 절대좌표를 비교하여 거리 오차를 나타냈고, 거리오차는 10cm(Maximum) 이내의 범위에 있는 것을 확인할 수 있다. 피쳐맵 작성이 끝난 후에 임의의 위치에서 실시간 자기 위치 추정을 수행할 때 실제 환경과 피쳐맵에서의 이동 로봇 절대 좌표와 헤딩 각도를 비

교하여 오차를 나타냈다. 이동 로봇의 실시간 자기 위치 추정시 절대 좌표가 8cm(Maximum) 이내의 범위를 갖고, 헤딩 각도 오차는 10°(Maximum) 이내의 범위를 갖는 것을 알 수 있다. 오차는 똑같은 환경에서 10번 반복 실험하여 평균으로 계산한 값이다.

표 1. 거리 오차와 각도 오차

| | 거리오차 | 각도오차 |
|--------------------------|--------------------|------------------|
| 제한한 피쳐맵 작성 알고리즘 | 10cm (Maximum) | - |
| 제한한 위치 추정 알고리즘 | 8cm (Maximum) | 10° (Maximum) |
| Evolution Robotics vSLAM | 12.5cm (Median) | 10° (Median) |

5. 결론

본 논문에서는 비용 절감을 위해 단안 카메라를 이용하였으며, 오차가 심하다는 단점을 보완하기 위해 환경 변수에 좋은 성능을 나타낸 SIFT변환을 통하여 특징점을 검출하였다. 그리고 이 특징점을 이용하여 매칭을 통해서 절대 좌표로 변환한 후에 10cm(Maximum) 이내의 범위로 정확한 피쳐맵을 작성할 수 있었다. 그리고 피쳐맵 작성을 마친 후 로봇은 임의의 위치에서 자율 주행하면서 실시간으로 자기 위치를 추정하게 된다. 이때 Evolution Robotics사와 비교하면 거리 오차는 8cm(Maximum) 이내로 더 좋은 성능이 나왔으며 각도 오차는 10°(Maximum) 이내로 비슷하게 나오는 것을 알 수 있었다.

추후 연구는 피쳐맵 작성과 실시간 위치 추정시 정확도를 높일 것이며, 피쳐맵 작성을 마친 로봇이 자기 위치를 인식하면서 장애물 회피나 목적지로 가는 경로를 계획하는 연구를 진행할 것이다.

참 고 문 헌

- [1] R. Smith, M Self and P. Cheeseman, "Estimating uncertain spatial relationships in robotics," *Autonomous Robot Vehicles*, I.J. Cox, G.T. Wilfong : Springer-Verlag, pp. 167-193, 1990.
- [2] J. Leonard and H.F. Durrant-Whyte, "Simultaneous map building and localization for an autonomous mobile robot," *Proc. of IEEE/RSJ Int. Workshop on Intelligent Robots and Systems*, vol. 3-5, pp. 1442-1447, 1991.
- [3] 이종실, "스케일 불변 특징을 이용한 이동 로봇의 위치 추정 및 매핑," *IKEEE*, 2005.
- [4] D.G. Low, "Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints," *International Journal of Computer Vision*, 60, 2, pp. 91-110, 2004.
- [5] D.G. Lowe, "Object Recognition from Local Scale Invariant Features," *In Proceedings of the 7th International Conference on Computer Vision, Kerkyra, Greece*, pp.1150-1157, 1999.