

직선 기반 SLAM에서 소실점을 이용한 loop closure 방법을 검증하기 위한 다양한 환경 하에서의 실험

강동훈, 장국현, *서일홍

한양대학교 전자통신컴퓨터공학과

e-mail : monopoet@naver.com, imzgx@incorl.hanyang.ac.kr, ihsuh@hanyang.ac.kr

Experimental Verification of a Vanishing Point-based Loop Closure Method in a Line-based SLAM under Various Environments

Dong Hun Kang, Guoxuan Zhang and *Il Hong Suh

Department of Electronics and Computer Engineering, Hanyang Univ.

Abstract - 직선을 기반으로 하는 SLAM(Simultaneous Localization and Mapping)은 실내의 복도 환경에서 인간에게 더 의미 있는 정보를 제공한다. 하지만 일반적인 복도 환경에서는 loop closure를 위한 강인한 지표(Landmark)를 찾기 어렵기 때문에 이전에 탐색했던 지역인지 알기 어렵다. 본 논문은 소실점(vanishing point) 정보로부터 절대적인 방향 지표를 제공받아 로봇이 이미 지도를 작성한 지역을 재방문 하였을 때 loop closure를 수행하는 방법을 검증하고자 다양한 환경 하에서 실험을 진행하고 결과를 확인하였다.

직선은 허프변환(Hough transform)을 사용하여 얻었고 픽셀의 연속성을 확인하여 직선의 양 끝점을 구한다. 검출한 직선을 수직선과 바닥선으로 나누고 대각방향의 선들을 이용해 소실점을 얻는다. 모델링 방법에 관한 더 자세한 내용은 다음 논문에 소개되어 있다[3, 8].

1. 서 론

최근 몇 년간 visual SLAM 분야는 많은 발전을 이루었다. 대부분의 연구는 점 정보를 이용하였는데 점은 직선에 비해 쉽게 검출되고 또 쉽게 표현할 수 있기 때문이다. 하지만 실내 환경에서는 직선을 이용한 SLAM이 점 정보를 이용한 SLAM에 비해 인간에게 더 유용한 정보를 제공할 수 있다는 연구가 제시되었다[2, 3]. 그래서 본 논문에서는 제안하는 방법을 검증하기 위해 점 정보 대신 직선 정보를 이용한 복도 환경에서의 EKF(Extended Kalman Filter) SLAM 시스템을 기반으로 구성하였다. 기존의 직선 기반 EKF SLAM 시스템에서는 loop closure가 바닥선의 기하정보(geometry)를 이용하여 이뤄지게 되는데 오차가 커지게 되면 loop closure가 일어나지 않거나 잘못된 결과를 보일 때가 많았다.



〈그림 1〉 수직선, 바닥선, 소실점 모두 SLAM을 위한 특징정보(feature)로 사용된다.

SLAM 분야는 많은 발전을 이루어 왔지만 그 중에서 loop closure에 관한 연구는 상대적으로 부족한 편이다. Loop closure문제는 SLAM에서 어렵고 중요한 문제이지만 센서의 종류나 환경에 따라 해결 방법이 다르기 때문에 일반적인 해결방법을 찾기가 어렵다. Loop closure문제가 발생하는 가장 큰 이유는 로봇이 SLAM을 수행하면서 현재의 지역이 이전에 방문했던 지역인지 아닌지를 알기 어렵고 상태(state)에 대한 불확실성이 점점 누적되기 때문이다. 특히 visual SLAM의 경우 영상에서 특징정보(feature)가 거의 나타나지 않는 부분에서 로봇이 회전을 할 경우 이 오차는 더욱 커지게 된다. 입력영상정보가 없으면 시스템은 로봇 자체의 바퀴정보(odometry information)에 크게 의존하게 되는데 로봇이 회전할 때의 미끄러짐 때문에 오차가 크게 증가하기 때문이다.

2.1.1 수직선

수직선은 2차원 평면도에서 점으로 표현 할 수 있는데 로봇에서 수직선까지의 거리를 바로 알 수 없기 때문에 수식(3)과 같이 2차원 지도 상의 inverse depth point로 표현한다[1].

$$y_i = (x_i, y_i, \alpha_i, \rho_i)^T \quad (3)$$

$(x_i, y_i)^T$ 는 수직선을 처음 발견했을 때의 로봇의 위치를 나타내고 α_i 는 로봇과 수직선을 연결한 직선과 x축 사이의 각도를 나타낸다. 그리고 ρ_i 는 inverse depth로서 본 논문에서는 그 초기값을 0.01로 하였다.

일반적인 복도 환경에서는 표면의 밋밋함(textureless surfaces) 탓에 강인한 지표를 찾기 어렵고 그곳이 이전에 탐색했던 지역인지 알기 어렵다. 항법(navigation) 분야에서 레이저레이더파인더(laser range finder)로부터 얻어진 직선정보를 사용하여 소실점을 구하고 이를 이용해 로봇의 방향을 추정하는 연구가 있었다[4]. 소실점은 절대적인 방향 지표를 제공하고 복도 환경에서 쉽게 찾을 수 있기 때문에 loop closure를 위한 특징으로 사용하는데 적합하다. 직선 기반 SLAM에서 소실점을 이용하여 복도 환경에서 loop closure를 성공적으로 수행하는 연구가 최근 제시되었고[8] 본 논문에서는 이를 다양한 환경에서 실험하고 검증하고자 한다.

수직선의 중심에서 좌우 5픽셀씩 총 11픽셀의 폭과 해당 직선의 길이(L)만큼의 총 $11 \times L$ 의 행렬로 각 원소들은 픽셀들의 밝기정보(pixel intensity)를 가지고 있다. 데이터의 대응관계(data association)를 판단할 때 이 정보를 비교하여 패치의 행벡터(row vector)들의 평균과 분산을 구하여 이 차가 임계값(threshold)보다 작으면 같은 수직선으로 판단한다.

2.1.2 바닥선

수직선과 비슷한 형태로 표현하지만 수직선과 달리 inverse depth ρ_i 를 사용하지 않고 depth d_i 를 사용한다.

$$y_i = (x_i, y_i, \alpha_i, d_i)^T \quad (4)$$

depth 정보를 바로 사용하는 이유는 로봇에 고정된 카메라의 높이를 알고 카메라와 바닥면 사이의 각도를 알 수 있어 바닥선에 대한 방향과 거리를 측정할 수 있기 때문이다.

바닥선의 대응관계판단은 수직선에 비해 훨씬 간단하다. 바닥선의 수직 방향으로 아래, 위에 대한 기울기(gradient descent)값을 가지고 비교하여 같은 바닥선인지 아닌지를 판단한다.

2. 본 론

2.1 상태정보

SLAM 시스템은 EKF를 적용하여 구현하였다. 시간 k에서 상태벡터(state vector)는 수식(1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$X_k = (r_k, y)^T \quad (1)$$

이때, r_k 는 로봇의 상태정보(state)를 나타내고 수식(2)처럼 표현한다.

$$r_k = (x_k, y_k, \phi_k)^T \quad (2)$$

y 는 수직선(vertical lines), 바닥선(floor lines), 소실점들의 상태(state)를 나타내고 2차원 공간상에서 서로 다른 형태로 표현한다. 바닥선은 바닥면 상에 있고, 수직선은 바닥면에서 점으로 표현하며 소실점은 간단히 방향을 가진 벡터로 표현한다. y 는 각각 다른 형태로 모델링되지만 공분산(covariance)을 구할 때는 3개 모델의 자코비안(Jacobian)은 합쳐져서 계산되어진다. 상태변수들(state variables)의 불확실성(uncertainty)은 가우시안 확률 분포(Gaussian probability distribution)로 나타낸다.

2.1.3 소실점

소실점은 3차원 공간상에서 평행하는 직선들을 무한히 연장하고 이를 2차원 이미지 평면으로 투영 하였을 때 그 평면상의 한 점에서 만나게 되는 지점을 가리킨다. 이미지 상에 나타나는 소실점은 3차원 공간상에서 무한히 멀리 떨어져 있는 점이 된다. 소실점은 실외 환경에서 차량이 진행 가능한 도로의 방향과 영역을 분석하거나[5] 대부분 직선적 요소로 구성된 실내 환경의 구조적 특징을 분석하는 문제[6] 등에 이용되며 특히 절대적 방향 지표를 찾는 데 중요한 실마리가 된다.

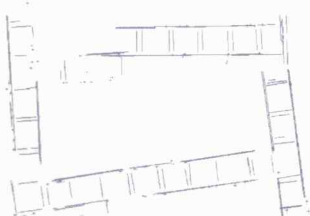
소실점은 마치 지구에서 바라보는 북극성과 같이 절대적 방향 지표를 제공하기 때문에 현재 로봇의 위치나 거리는 의미가 없어지고 방향만을 가지게 된다. 그래서 수식(5)와 같이 간단하게 표현할 수 있다.

$$y_i = \alpha_i \quad (5)$$

* 교신 저자 : 서일홍, ihsuh@hanyang.ac.kr

소실점을 찾는 방법은 다음과 같다. 먼저 영상으로부터 직선을 모두 찾고 그중에서 대각성분을 가진 직선들을 가려낸다. 그 후 대각선들의 교점을 모두 구한 후 이를 소실점의 후보로 사용해 RANSAC을 통해 지배적인 소실점을 결정한다. 대각선들로부터 구한 교점들의 평균을 낸 후 임계값 이하인 교점을 버리고 나머지 교점들에 대한 평균을 구해 최종적으로 소실점을 구한다.

지도상의 소실점과 영상으로부터 얻어진 소실점을 비교하여 방향 각도의 차이가 임계값보다 작으면 같은 소실점으로 판단하게 되고 이러한 특성을 이용하여 로봇이 이전에 지나갔던 복도를 다시 찾게 되면 소실점끼리 대응(matching) 되어 오차가 줄어들게 된다.



<그림 2> loop closure 실패 예시

2.2 Loop closure

Loop closure 는 이미 한번 방문했던 지역을 다시 찾아왔을 때 이를 인식할 수 있는지에 관한 문제이다. 이미지 장면들을 비교하여 방문했던 지역인지 새로운 곳인지를 판단하는 방법[7]이 많이 사용되지만 점 정보의 특징이 거의 나타나지 않는 복도 환경에서는 이러한 방법을 적용하기 어렵다. 기존의 직선기반 SLAM에서는 바닥선을 비교하여 근처에 새로운 바닥선이 발견됐을 때 위치와 방향을 비교하여 같은 곳인지 알아낸다. 하지만 오차가 많이 누적되면 위치와 방향이 많이 달라져 loop closure에 실패하게 되는데, <그림 2>는 실패 예를 나타내고 있다.

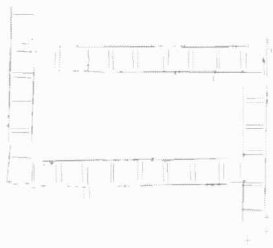
이러한 실패를 없애기 위해 소실점을 사용해서 오차를 줄이는 방법을 사용했다. 로봇이 전에 방문했던 복도를 재방문하게 되면 소실점의 절대적인 방향 지시 능력으로 이전에 등록되었던 소실점을 발견함으로써 위치정보를 1차적으로 수정하게 되고 그 다음에 바닥선을 다시 봄으로써 바닥선 거리 대응(data association)이 되면서 2차적으로 수정하게 된다. 이렇게 두 번에 걸친 loop closure 방법으로 실패 확률을 줄이고 더 정교한 지도가 만들어지게 된다. 다음 소절에서 다양한 실험을 통해 loop closure의 효율성을 검증하고자 한다.

2.3 실험결과

실험에 쓰이는 로봇은 Pioneer 3-DX 이고 로봇 위에 바닥으로부터 1m 높이에 Logitech QuickCam E3500을 설치하였다. 영상은 320×240 pixels로 처리하였다. 다양한 실험 환경을 위해 바닥선과 수직선이 모두 잘 관측되는 복도 환경<그림 3>, 바닥선이 부족한 복도 환경<그림 4>, 삼각 형태를 이루는 복도 환경<그림 5> 등, 모두 3곳에서 실험을 진행하였다. 로봇은 사용자가 직접 조종해 실험하였는데 처음 시작하는 곳에서부터 복도를 한 바퀴를 돌아 다시 원래 위치까지 돌아와 loop closure가 일어남으로써 끝난다.

실험에서 수직선, 바닥선, 소실점 모두 특징정보(feature)로 사용되었고, EKF 알고리즘을 사용하여 SLAM을 수행하였는데 시스템의 입력으로는 단안카메라의 영상과 로봇의 바퀴정보(odometry information)를 사용하였다. Loop closure을 위한 특별한 알고리즘이 필요 없이 EKF SLAM 알고리즘을 통해 자동으로 loop closure가 수행된다.

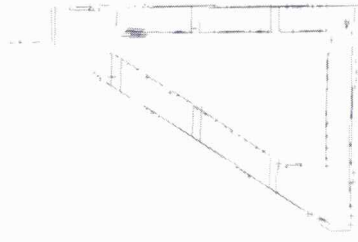
<그림3, 4, 5>는 다양한 실험 환경에서 loop closure가 성공적으로 이뤄진 결과를 보여준다. 각각 실험 환경에서 로봇이 이동하면서 예러가 누적되지만 로봇이 마지막 코너를 돌아갈 때 소실점에 의해서 한번 loop closure가 일어나고 바닥선에 의해서 한번 더 loop closure가 되는 과정을 볼 수 있었다. 실시간으로 실험한 결과 소실점을 쓰지 않고 바닥선을 loop closure feature로 사용했을 때에는 10회 중 6회에서 loop closure에 성공하였고 소실점도 함께 SLAM 특징정보(feature)로 같이 사용했을 때에는 10회중 10회 모두 loop closure에 성공하였다.



<그림 3> 바닥선과 수직선이 잘 관측되는 곳에서의 실험결과



<그림 4> 바닥선이 부족한 곳에서의 실험결과



<그림 5> 삼각 형태를 이루는 복도에서의 실험결과

3. 결 론

이 시스템에서 loop closure는 두 단계에 걸쳐 수행된다. 첫 번째로 SLAM을 수행하면서 누적되는 오차를 이전에 등록되었던 소실점을 발견함으로써 감소시킬 수 있고 두 번째로 바닥 라인을 다시 봄으로써 데이터 대응(data association)이 되면서 지도를 더 정확하게 교정하게 된다. 본 논문에서는 직선 기반 SLAM에서 소실점을 이용한 loop closure방법을 검증하고자 다양한 복도 환경에서 실험을 진행하였다. 실험 결과를 보면 복도 환경에서는 직선 성분이 많고 소실점을 쉽게 찾을 수 있어 이 방법이 매우 효과적임을 검증하였다. 향후에는 복도가 아닌 다른 실내 환경이나 도로가 있는 실외 환경에서 본 알고리즘이 적용될 수 있는지 연구를 진행할 예정이다.

[참 고 문 헌]

- [1] J. Civera, A. Davison, and J. Montiel, "Inverse depth parametrization for monocular SLAM," IEEE Trans. on Robotics, vol. 24, no. 5, 2008.
- [2] J. Solá and T. Vidal-Calleja and M. Devy, "Undelayed initialization of line segments in monocular SLAM," in Proc. of The IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, October 11-15, St. Louis, USA, 2009.
- [3] G. Zhang, I. H. Suh, "SoF-SLAM: Segments-on-Floor-based Monocular SLAM," in Proc. of The IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Taiwan, 2010.
- [4] Y. H. Lee, C. Nam, K. Y. Lee, Y. S. Li, S. Y. Yeon, and N. L. Doh, "VPass: Algorithmic Compass using Vanishing Points in Indoor Environments," in Proc. Of IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, 2009.
- [5] Hui Kong, J. Y. Audibert, J. Ponce, "Vanishing Point Detection for road detection", In IEEE Intl. Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition(CVPR), 2009.
- [6] Y. B. Park, S. S. Kim, I. H. Suh, "Visual Recognition of Types of Structural Corridor Landmarks Using Vanishing Points Detection and Hidden Markov Models", In IEEE Intl. Conf. on International Conference on Pattern Recognition, 2010.
- [7] K. L. Ho, P. Newman, "Detecting Loop Closure with Scene Sequences", International Journal of Computer Vision, 2006.
- [8] G. Zhang, D. H. Kang, and I. H. Suh, "Loop Closure Through Vanishing Points in a Line-based Monocular SLAM" Submitted for the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2011.