

공학석사학위논문

선분 카메라쌍 알고리즘을 이용한 사각형 특징의
기하학적 자세 추정을 통한 Factor Graph 기반
비주얼 SLAM

Factor Graph based Visual SLAM with Geometric Pose
Estimation of a Rectangle Feature using Coupled Line
Camera Algorithm

충 북 대 학 교 대 학 원

전기·전자·컴퓨터학부 제어로봇공학전공

이 재 민

2016 년 8 월

공학석사학위논문

선분 카메라쌍 알고리즘을 이용한 사각형 특징의
기하학적 자세 추정을 통한 Factor Graph 기반
비주얼 SLAM

Factor Graph based Visual SLAM with Geometric Pose
Estimation of a Rectangle Feature using Coupled Line
Camera Algorithm

지도교수 박 찬 식

전기·전자·컴퓨터학부 제어로봇공학전공

이 재 민

이 논문을 공학석사학위 청구논문으로 제출함.

2016 년 6 월

본 논문을 이재민의 공학석사학위 논문으로 인정함.

심사위원장 _____ (인)

심사위원 _____ (인)

심사위원 _____ (인)

충북대학교대학원

2016년 6월

차 례

Contents	i
List of Figures	ii
List of Tables	iii
Abstract	iv
I. 서론	1
1.1 연구 배경	1
II. 사각형 특징 기반 Visual SLAM	6
2.1 카메라 모델	6
2.2	6
2.3 자세 추정을 위한 사각형 복원 방법	6
2.3.1 선분 카메라쌍 방법을 이용한 사각형 복원 방법	6
2.3.2 3차원 자세 추정을 위한 스테레오 카메라 기반의 선분카메라 쌍 방법	6
2.4 FactorGraphSLAM	6
III. 사각형 특징 추출(segmentation)	8
참 고 문 헌	9

List of Figures

List of Figures	ii
2.1 A picture of the same gull looking the other way!	7

List of Tables

Factor Graph based Visual SLAM with Geometric Pose Estimation of a Rectangle Feature using Coupled Line Camera Algorithm*

Lee, Jae-Min

School of Electrical Engineering and Computer Science,
Graduate School of Chungbuk National University,
Cheongju, Korea

Supervised by Professor Chan sik Park

Abstract

In this paper, we propose a method for estimating the pose of the camera using a rectangle feature utilized for the visual SLAM. A warped rectangle feature as a quadrilateral in the image by the perspective transformation is reconstructed by the Coupled Line Camera algorithm. In order to fully reconstruct a rectangle in the real world coordinate, the distance between the features and the camera is needed. The distance in the real world coordinate can be measured by using a stereo camera. Using properties of the line camera, the physical size of the rectangle feature can be induced from the distance. The correspondence between the quadrilateral in the image and the rectangle in the real world coordinate can restore the relative pose between the camera and the feature through obtaining the homography. In order to evaluate the performance, we analyzed the result of proposed method

with its reference pose in Gazebo robot simulator.

*A thesis for the degree of Master in August 2016.

I. 서론

1.1 연구 배경

자율 이동 로봇의 성공적인 임무 수행을 위해서는 주변 환경의 정보를 정합하고 자신의 위치를 파악하여 목표로의 접근을 위한 구동을 결정할 수 있어야 한다. 이 때 화성 탐사선, 재난 구조 로봇, 탄광 탐사로봇과 같이 사전에 정보가 주어지지 않은 환경에 놓인 로봇은 취득한 환경정보를 이용하여 스스로 지도를 작성하고 그 위의 자신의 위치를 추정하며 임무를 수행하여야 한다. 이러한 기술을 SLAM(Simultaneous Localization and Mapping)이라 하고 1986년 IEEE Robotics and Automation Conference에서 확률론적으로 문제에 접근하는 방안에 대한 토의를 가진 이후 이를 기반으로 연구가 계속되고 있다[1]. 확률론으로 SLAM문제를 수식화하여 계산하기 위해 전통적으로 Extended Kalman Filter[2], Unscented Kalman Filter[3], Extended Information Filter[4], Rao-Blackwellized Particle Filter[5]등의 recursive bayesian filtering기술이 응용되었다. 이후 SLAM문제를 Belief Network, Markov Random Field 등의 그래프 모델로 표현하고 그래프 최적화 기술을 이용하여 해결하고자 하는 시도가 이어졌고[6], 현재까지 많은 연구자들이 이 접근법을 바탕으로 SLAM기술의 계산 복잡도, loop closure, 동적으로 변하는 환경 등에 대한 문제를 강인한 특징 추출 방식 제안 및 센서 처리 방식 개선, 지도 표현 방식 변경과 같은 다양한 방법으로 해결하고자 하는 노력이 이어지고 있다.

알려지지 않은 환경의 정보를 취득하기 위해 어떤 센서를 사용할 것인지 결정하는 것

은 SLAM기술의 구체적인 형태와 성능을 크게 좌우한다. 센서로는 거리정보 기반의 LiDAR(Light Detection and Ranging)센서와 Sonar(Sound Navigation and Ranging)센서, RF(Radio Frequency) 또는 자기장을 이용한 인공 표식 인식 센서 그리고 카메라 등이 이용될 수 있다. 그러나 자율 이동 로봇이 임무를 수행하기 위한 환경 중 우주나 재해환경, 접근 불가 지역과 같이 사람의 접근과 활동의 제약이 존재하는 환경에서 인공 표식을 사전에 설치하여 SLAM에 활용하는 것은 굉장히 제한적일 수 밖에 없다. 따라서 SLAM에 관련된 많은 연구와 적용 사례들은 주어진 환경을 직접 추출할 수 있는 거리-방향 센서를 사용하여 문제를 정의하며 해결하고 있다. 그 중 자율 이동 로봇의 응용으로 가장 많이 연구되고 있는 두 센서는 LiDAR와 카메라로, 단일 센서를 이용한 연구는 물론 복수의 센서 또는 융합 센서 시스템을 구성하여 SLAM문제를 해결하는 연구도 활발하게 진행되어 왔다.

LiDAR는 센서로 부터 송출된 적외선의 Time-of-Flight를 응용하여 2차원 혹은 3차원 환경에 대한 거리 정보를 취득하는 능동형 센서이다. 충분히 강한 출력의 광원이 사용된다면 조명에 강인하고 일정한 검출 시간과 성능을 보장받을 수 있는 장점이 있으나 고정밀기계장치를 이용하여 충격에 민감하고 가격이 고가이다. 또한 점군으로 표현된 환경에 대한 거리정보는 취득 영역의 부피에 비해 비교적 적은 수 이고, 신호 세기 등 거리 이외의 정보는 취급이 어렵거나 사용이 제한적이기 때문에 데이터의 정보량은 비교적 적다고 할 수 있다. 카메라는 외부의 광원에서 발해져 직접 투사되거나 주변 물체에 반사되어 들어온 가시광선 근방의 전자기파에 대한 정보를 취득하는 감응형 센서이다. 주변 광원의 상태에 따라 사용에 제약을 받을 수 있으나 저렴한 가격에 고밀도의 환경정보를 취득할 수 있는 장점이 있다. 연산에 사용되는 로봇의 컴퓨터 혹은

연구용 워크스테이션의 성능이 높아지면서 보다 방대한 자료를 빠르게 처리할 수 있게 되어, 최근에는 저가에 풍부한 환경 정보를 취득할 수 있는 카메라를 이용하는 SLAM 기술의 연구가 각광을 받고 있다. 또한 두 센서의 장점을 살려 융합 시스템을 구축, 활용하는 방법도 제시되어 있다[7].

단안카메라를 이용하여 SLAM문제를 해결하고자 하는 초기 시도는 Lowe의 SIFT(Scale Invariant Feature Transform)를 이용한 SLAM[8]과 particle filter를 이용한 SLAM[9], extended kalman filter를 기반으로 단안 카메라를 이용한 실시간 SLAM방법[10]이 있다. 이 후 이동 로봇 분야에서의 위치 추정 및 지도 작성 문제에 대해 카메라를 이용한 접근의 유효성이 입증 된 이후 후속 연구가 활발하게 연구가 진행되고 있다. 컴퓨터 비전 분야에서는 카메라를 이용하여 주어진 환경의 3차원 정보를 재구성하는 Structure from motion(SfM)이라는 문제가 로봇에서 통용되는 SLAM과 유사하다. 전통적인 SfM은 사전에 취득한 데이터에 대해 Bundle Adjustment[11]기법을 사용하여 연산 시간에 무관하게 고정밀의 결과를 얻는 것에 초점을 맞추고 있다. 근래들어 증강현실 등 실시간 처리 방법의 필요성이 대두됨에 따라 병렬연산과 Local Bundle Adjustment기법을 이용하여 실시간 SfM문제를 해결하는 방법[12]이 제안되면서 카메라를 이용한 위치 인식 및 지도 작성에 대한 연구의 다른 접근 방식이 정립되었다. 이에 따라 로봇 분야에서 전통적으로 사용되던 Recursive filtering방식과 컴퓨터 비전 분야에서 사용되던 graph optimization방식에 대한 분석[13]이 이루어졌고 연산 속도, 정확도, scalability등을 종합적으로 고려하였을 때 후자의 접근이 보다 바람직함을 제시하였다. 최신의 연구에서는 향상된 컴퓨터 성능과 General Purpose Graphic Processing Unit(GPGPU)의 사용이 용이해지면서 영상에서 특징을 명시적으로 추출하지

않고, 영상의 세기 정보를 직접 이용하여 카메라를 이용하여 실시간으로 SLAM을 해결하는 방법들이 제안되었다[14, 15].

SLAM에서는 정밀한 지도 작성 및 위치 추정과 더불어 동적으로 변화하는 환경에 강인한 시스템을 구성하는 것 또한 중요한 문제로 여겨져 왔다. 일부에서는 생물해부학적 지식을 활용하여 설치류의 공간 지각 시스템을 모방하여 통계학적 추정을 기반으로 하는 기존의 것과 완전히 구별되는 시스템을 제안하여 동적인 환경 변화에 대해 대처하고자 하는 시도가 있었다[16]. 근래의 연구에서는 환경 변화에 대처하기 위해 기존의 SLAM시스템에 장소 인식 방법을 이용하여 성능을 보완하는 형태로 연구가 진행되어 왔다. 특징의 복잡도가 높지 않은 저 수준의 시각 특징으로 Chow-liu tree구조의 Bag-of-words를 구성하여 장소 인식을 수행하는 방법[17]이 정확도와 속도에서 우수한 성능을 보이고 있어 많은 후속 연구들이 이에 기반을 두고 있다. Loop closure 검출을 위해 장면이라는 고수준의 특징을 사용하여 반경 1000km수준의 대규모 환경, 운행 기간 1년 이상의 장기 구동, 눈, 비 등의 기후 변화에도 강인하게 SLAM 문제에 대처할 수 있는 연구도 진행되었다[18].

점 특징 기반의 SLAM이 가지는 한계를 타파하기 위해 다른 형태의 시각 특징을 이용하는 접근도 연구되고 있다. Li의 연구에서는 연속된 영상에서 추출한 광류(optical flow)를 이용해 평면 특징을 이용하여 위치 추정 오차를 줄이고자 시도하였고[19], Lu의 연구에서는 기존의 점 특징과 함께 선분, 직선, 평면, 소실점 등을 그래프로 구성하여 추가된 기하 정보를 이용하여 정밀한 위치 추정을 가능케 하였다[20]. RGB-D 카메라를 통해 얻을 수 있는 추가적인 공간 정보를 함께 사용하여 3차원의 물체를 구분하고 3차원 강제 움직임을 가지는 landmark로서 SLAM에 사용한 연구도 있다[21]

.

위에서 카다양한 방법으로 SLAM의 정확도를 높이고자 하는 시도가 있었다. 본 논문에서는

II. 사각형 특징 기반 Visual SLAM

2.1 카메라 모델

2.2

2.3 자세 추정을 위한 사각형 복원 방법

[28][29]

[30, 31] [32]

2.3.1 선분 카메라쌍 방법을 이용한 사각형 복원 방법

2.3.2 3차원 자세 추정을 위한 스테레오 카메라 기반의 선분카메라쌍 방법

2.4 FactorGraphSLAM

[33][34][35]

2.1



Figure 2.1: A picture of the same gull looking the other way!

III. 사각형 특징 추출(segmentation)

[22][23][24][25][26][27]

참 고 문 헌

- [1] B. Y. H. Durrant-whyte, T. I. M. Bailey, P. Cheeseman, J. Crowley, H. Durrant, and H. Durrant-Whyte, “Simultaneous localization and mapping: part I,” *Robotics & Automation Magazine, IEEE*, vol. 13, no. 2, pp. 99–110, 2006.
- [2] G. Dissanayake, H. Durrant-whyte, and T. Bailey, “A computationally efficient solution to the simultaneous localization and map building (slam) problem.” in *Robotics and Automation, 2000. Proceedings. ICRA '00. IEEE International Conference on*, no. April 2000, 2000, pp. 1009 – 1014 vol.2. [Online]. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs{ }all.jsp?arnumber=844732{&}tag=1>
- [3] R. Martinez-Cantin and J. A. Castellanos, “Unscented SLAM for large-scale outdoor environments,” in *2005 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, IROS*, 2005, pp. 328–333.
- [4] S. Thrun, Y. Liu, D. Koller, A. Ng, Z. Ghahramani, and H. Durrant-Whyte, “Simultaneous Localization and Mapping with Sparse Extended Information Filters,” *The International Journal of Robotics Research*, vol. 23, no. 7, pp. 693–716, 2003. [Online]. Available: <http://discovery.ucl.ac.uk/185393/>
- [5] M. Montemerlo, S. Thrun, D. Koller, and B. Wegbreit, “FastSLAM: A factored solution to the simultaneous localization and mapping problem,” in *Proceed-*

- ings of the National conference on Artificial Intelligence.* Menlo Park, CA; Cambridge, MA; London; AAAI Press; MIT Press; 1999, 2002, pp. 593–598.
- [6] R. Kümmerle, G. Grisetti, H. Strasdat, K. Konolige, and W. Burgard, “G2o: A general framework for graph optimization,” *Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 3607–3613, 2011.
 - [7] P. Newman, D. Cole, and K. Ho, “Outdoor SLAM using visual appearance and laser ranging,” in *Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation*, vol. 2006, 2006, pp. 1180–1187.
 - [8] S. Se, D. Lowe, and J. Little, “Vision-based global localization and mapping for mobile robots,” *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 21, no. 3, pp. 364–375, 2005.
 - [9] E. Eade and T. Drummond, “Scalable Monocular SLAM,” *2006 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition - Volume 1 (CVPR’06)*, vol. 1, pp. 469–476, 2006. [Online]. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=1640794>
 - [10] A. J. Davison, I. D. Reid, N. D. Molton, and O. Stasse, “MonoSLAM: Real-time single camera SLAM,” *Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on*, vol. 29, no. 6, pp. 1052–1067, 2007.
 - [11] B. Triggs, P. F. McLauchlan, R. I. Hartley, and A. W. Fitzgibbon, “Bundle Adjustment — A Modern Synthesis,” *Vi-*

- sion Algorithms: Theory and Practice*, vol. 1883, pp. 298–372, 2000. [Online]. Available: [http://dx.doi.org/10.1007/3-540-44480-7_{-}21\\$\\delimiter"026E30F\\$nhhttp://link.springer.com/10.1007/3-540-44480-7_{-}21](http://dx.doi.org/10.1007/3-540-44480-7_{-}21$\\delimiter)
- [12] G. Klein and D. Murray, “Parallel tracking and mapping for small AR workspaces,” *2007 6th IEEE and ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality, ISMAR*, 2007.
- [13] H. Strasdat, J. M. M. Montiel, and A. J. Davison, “Real-time monocular SLAM: Why filter?” *Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 2657–2664, 2010.
- [14] C. Forster, M. Pizzoli, and D. Scaramuzza, “SVO : Fast Semi-Direct Monocular Visual Odometry,” in *IEEE Int. Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 2014.
- [15] J. Engel, T. Sch, and D. Cremers, “LSD-SLAM: Large-Scale Direct Monocular SLAM,” *Eccv*, pp. 1–16, 2014.
- [16] M. J. Milford and G. F. Wyeth, “Biologically Inspired SLAM System,” *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 24, no. 5, pp. 1038–1053, 2008.
- [17] M. Cummins and P. Newman, “Appearance-only SLAM at large scale with FAB-MAP 2.0,” *The International Journal of Robotics Research*, vol. 30, no. 9, pp. 1100–1123, 2011. [Online]. Available: <http://ijr.sagepub.com/cgi/doi/10.1177/0278364910385483>

- [18] M. J. Milford and G. F. Wyeth, “SeqSLAM: Visual route-based navigation for sunny summer days and stormy winter nights,” *Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 1643–1649, 2012.
- [19] W. Li and D. Song, “Toward featureless visual navigation : simultaneous localization and planar surface extraction using motion vectors in video streams,” in *IEEE Int. Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 2014, pp. 9–14.
- [20] Y. Lu and D. Song, “Visual Navigation Using Heterogeneous Landmarks and Unsupervised Geometric Constraints,” *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 31, no. 3, pp. 736–749, 2015.
- [21] R. F. Salas-Moreno, R. A. Newcombe, H. Strasdat, P. H. J. Kelly, and A. J. Davison, “SLAM++: Simultaneous localisation and mapping at the level of objects,” in *Proceedings of the IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2013, pp. 1352–1359.
- [22] W. Zhang and J. Košecká, “Extraction, matching and pose recovery based on dominant rectangular structures,” in *Proceedings - 1st IEEE International Workshop on Higher-Level Knowledge in 3D Modeling and Motion Analysis, HLK 2003*, 2003, pp. 83–91.
- [23] F. Han and S. C. Zhu, “Bottom-up/top-down image parsing with attribute grammar,” *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 31, no. 1, pp. 59–73, 2009.

- [24] B. Mičušík, H. Wildenauer, and J. Košecká, “Detection and matching of rectangular structures,” in *26th IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, CVPR*, 2008.
- [25] C. R. Jung and R. Schramm, “Rectangle detection based on a windowed hough transform,” *Brazilian Symposium of Computer Graphic and Image Processing*, pp. 113–120, 2004.
- [26] J. C. Bazin, I. Kweon, C. Demonceaux, and P. Vasseur, “Rectangle extraction in catadioptric images,” *Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision*, 2007.
- [27] H. Bhaskar, N. Werghi, and S. Al Mansoori, “Combined spatial and transform domain analysis for rectangle detection,” *Audio, Transactions of the IRE Professional Group on*, pp. 1–7, 2010. [Online]. Available: http://pubget.com/site/paper/pgtmp_{_}ieee0b000064814b433a?institution=papers2://publication/uuid/BFC221B5-E8D2-4CE8-B526-D867F2D347F8
- [28] J. J. Guerrero, a. C. Murillo, and C. Sagüés, “Localization and matching using the planar trifocal tensor with bearing-only data,” *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 24, no. 2, pp. 494–501, 2008.
- [29] D. Nistér, “Preemptive RANSAC for live structure and motion estimation,” *Machine Vision and Applications*, vol. 16, no. 5, pp. 321–329, 2005.

- [30] J.-H. Lee, “Camera calibration from a single image based on coupled line cameras and rectangle constraint,” in *Pattern Recognition (ICPR), 2012 21st International ...*, no. Icpr, 2012, pp. 758–762. [Online]. Available: http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs/_all.jsp?arnumber=6460245
- [31] —, “A New Solution for Projective Reconstruction Based on Coupled Line Cameras,” *ETRI Journal*, vol. 35, no. 5, pp. 939–942, oct 2013. [Online]. Available: <http://etrij.etri.re.kr/etrij/journal/article/article.do?volume=35&issue=5&page=939>
- [32] —, “New Geometric Interpretation and Analytic Solution for Quadrilateral Reconstruction,” in *2014 22nd International Conference on Pattern Recognition*. IEEE, aug 2014, pp. 4015–4020. [Online]. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6977401>
- [33] F. Dellaert and M. Kaess, “Square Root SAM: Simultaneous Localization and Mapping via Square Root Information Smoothing,” *The International Journal of Robotics Research*, vol. 25, no. 12, pp. 1181–1203, 2006.
- [34] M. Kaess, A. Ranganathan, and F. Dellaert, “iSAM: Fast incremental smoothing and mapping with efficient data association,” *Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation*, no. April, pp. 1670–1677, 2007.

- [35] M. Kaess, H. Johannsson, R. Roberts, V. Ila, J. Leonard, and F. Dellaert, “ISAM2: Incremental smoothing and mapping with fluid relinearization and incremental variable reordering,” *Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 3281–3288, 2011.

감사의 글

감사의 글을 적으시면 되겠습니다. 감사합니다.

이재민 배상