

스테레오 영상을 활용한 3차원 지도 복원과 동적 물체 검출에 관한 연구

서보길*, 윤영호, 김규영
국방기술품질원

A Study of 3D World Reconstruction and Dynamic Object Detection using Stereo Images

Bo-Gil Seo*, Young Ho Yoon, Kyu Young Kim
Defence agency for Technology and Quality(DTaQ)

요약 실제 환경에서는 움직이지 않는 정적 물체만큼이나 많은 수의 움직이는 동적 물체가 존재한다. 사람은 정적 물체와 동적 물체를 쉽게 구분할 수 있지만, 자율 주행 차량이나 모바일 로봇은 이를 구분하지 못한다. 따라서 차량이나 로봇이 성공적이고 안정적인 자율 주행을 수행하기 위해서는 정적 물체와 동적 물체를 정확하게 구분하는 것이 중요하다. 이를 수행하기 위해서 자율 주행 차량이나 모바일 로봇은 카메라, 라이다 등과 같은 다양한 센서 시스템을 활용할 수 있다. 그중에서 스테레오 카메라 영상은 자율 주행을 위해 많이 활용하는 데이터이다. 스테레오 카메라 영상은 물체 분할, 분류, 추적과 같은 물체 인식 분야는 물론 3차원 지도 복원과 같은 네비게이션 분야에 활용할 수 있다. 본 연구에서는 실시간으로 주행하는 차량과 로봇을 위하여 스테레오 영상을 활용한 정적/동적 물체 구분 방법을 제안하고, 향후 네비게이션 목적으로도 활용할 수 있도록 3차원 지도를 복원하여 이를 적용한 결과 및 성능 확인을 위한 정확도 분석 결과(99.81%)를 제시한다.

Abstract In the real world, there are both dynamic objects and static objects, but an autonomous vehicle or mobile robot cannot distinguish between them, even though a human can distinguish them easily. It is important to distinguish static objects from dynamic objects clearly to perform autonomous driving successfully and stably for an autonomous vehicle or mobile robot. To do this, various sensor systems can be used, like cameras and LiDAR. Stereo camera images are used often for autonomous driving. The stereo camera images can be used in object recognition areas like object segmentation, classification, and tracking, as well as navigation areas like 3D world reconstruction. This study suggests a method to distinguish static/dynamic objects using stereo vision for an online autonomous vehicle and mobile robot. The method was applied to a 3D world map reconstructed from stereo vision for navigation and had 99.81% accuracy.

Keywords : Autonomous Vehicle, Mobile Robot, Stereo Image, 3D Reconstruction, Dynamic Object

1. 서론

우리가 사는 실제 환경에서는 움직이지 않는 정적 물체만큼 많은 수의 움직이는 동적 물체가 존재한다. 자율

주행 차량이 이미 상용화된 만큼, 자율 주행 기술 수준에 따라 차량이나 모바일 로봇의 자율 주행 능력을 좌우한다고 말할 수 있다. 성공적이고 안정적인 자율 주행을 위해서는 차량이나 로봇 주변의 물체를 인식하고, 정적/동

*Corresponding Author : Bo-Gil Seo(Defence agency for Technology and Quality)
email: bogilsmart@dtaq.re.kr

Received July 24, 2019

Accepted October 4, 2019

Revised August 20, 2019

Published October 31, 2019

적 물체를 구분한 다음 이에 대응책을 스스로 세울 수 있어야 한다. 즉, 자율 주행 차량이나 모바일 로봇은 인식한 물체에 대하여 정적 물체인지 동적 물체인지 구별할 필요가 있고, 인식한 물체가 동적 물체라는 사실을 인지했다면 동적 물체의 대략적인 속도를 예측하고 이동 방향을 파악할 필요가 있다. 마지막으로 앞서 언급한 과정이 실시간으로 처리되어야 차량이나 로봇이 자율 주행하는 것에 대하여 문제가 없을 것이다.

자율 주행 차량이나 모바일 로봇이 주변 물체를 인식하고, 물체의 정적/동적 상태를 인지하며, 3차원 지도를 복원하기 위하여 카메라, 라이다 등과 같은 다양한 센서 시스템을 구축하여 이를 활용할 수 있는데, 카메라 영상은 자율 주행하기 위하여 많이 활용하는 데이터이다. 주행을 통하여 획득한 주변 영상 정보를 활용하여 복원한 3차원 지도의 경우, 정적/동적 물체를 구분하기보다는 동적 물체는 이상점(Outlier)로 분류하여 제거하고 정적 물체만을 가지고 3차원 지도를 복원하는 것이 일반적이다[1]. 3차원 지도를 복원하지 않은 상태에서 카메라 영상을 활용하여 동적 물체를 찾는 방법은 많이 제안되었다[2]. [2]에서는 스테레오 영상을 활용하여 정적/동적 물체를 2차원 격자 지도상에 표현하였다. 하지만 자율 주행 차량이나 모바일 로봇은 3차원 환경에서 주행하므로 2차원 격자 지도만으로 실제 3차원 환경에서의 물체의 정적/동적 상태를 모두 반영하는 것은 한계가 존재한다.

본 연구에서는 앞서 언급한 관련 연구결과를 토대로 2차원 스테레오 영상에 정적/동적 물체를 구분하는 일반적이고 간단한 방법을 적용하여 정적/동적 물체를 빠르게 구분하고, 구분한 결과를 복원한 3차원 지도에 표현하는 방법을 제안한다. 제안한 방법은 자율 주행 차량과 모바일 로봇의 자율 주행에 활용 가능토록 영상을 획득 이후 실시간으로 알고리즘이 동작한다.

2. 본론

2.1 관련 연구

본 연구는 실시간으로 획득한 스테레오 영상을 활용하여 정적/동적 물체를 구분함과 동시에 3차원 지도를 복원하는 것을 목적으로 하였기에 영상을 활용한 정적/동적 물체 구분 방법과 3차원 지도 복원 관련 연구를 조사하였다. 네비게이션 목적으로 두 개의 카메라 영상을 활용하여 3차원 지도를 복원할 경우 일반적으로 쓰이는 방법은 공액기하(Epipolar Geometry)이다[3].

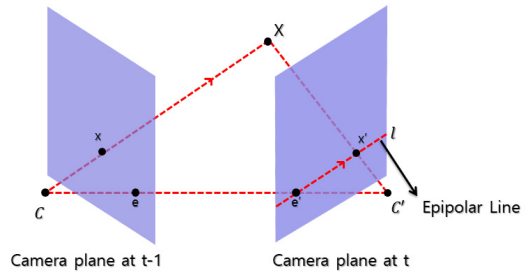


Fig. 1. Epipolar Geometry

Fig. 1에서 알 수 있듯이 3차원에서의 한 점 X와 특정 시간대인 t-1, t에서 획득한 카메라 영상에서의 각 카메라 중심점(C, C')을 안다면, 3차원 점 X는 두 영상 평면 내 2차원 점 x, x'로 투영된다. 이 때 X, C, C'은 한 평면상에 위치하며, 이 세 점이 이루는 3차원 평면을 공액면(epipolar plane)이라 한다. 공액면은 두 영상 평면과 교차하게 되며, 이 두 교차점 e, e'을 epipole이라 한다. 마지막으로 영상 평면에서 획득한 x, e를 연결한 선(l)을 공액선(epipolar line)이라고 한다. 공액기하를 스테레오 영상에 적용하면 3차원 정보를 획득할 수 있는데, 단순히 하나의 영상만으로는 3차원으로 복원할 때 필요한 거리(depth)를 알 수 없기 때문이다. 스테레오 영상에 공액기하를 이용할 경우, 앞서 설명한 것 처럼 3차원 점 X와 X의 영상 평면에서의 투영점 x를 알 경우 그에 상응하는 다른 영상 평면에서의 투영점 x'를 알 수 있게 된다. 이 성질을 활용하여 스테레오 영상에서 특정 점이 정적 상태인지 동적 상태인지 확인할 수 있다.

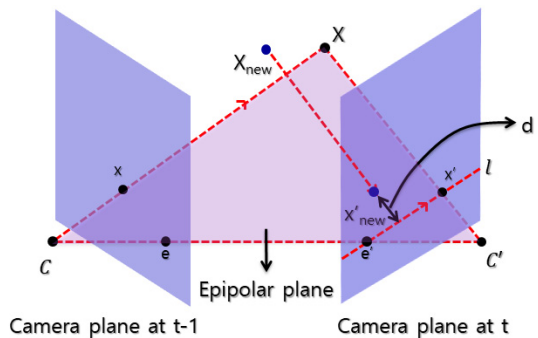


Fig. 2. Finding moving point using Epipolar Geometry

Fig. 2는 앞서 설명한 공액 기하를 이용하여 특정 점의 상태가 정적인지 동적인지 확인하는 방법을 나타낸다. 3차원 점 X가 동적 상태여서 공액 평면보다 위쪽으로 이

동하고, 이 때 새로운 3차원 점을 X_{new} 로 정의해본다면 t 시간의 영상 평면에 투영된 점 x'_{new} 의 경우 공액선보다 위에 투영될 것이다. 즉, 영상 평면에서 투영된 점과 공액선 사이의 거리(d)가 발생하게 되고, 거리 정보가 측정되는 점들은 동적 상태에 해당하는 점들로 추정할 수 있게 되는 것이다[4].

하지만 모노 카메라를 통하여 획득한 스테레오 영상을 활용하여 정적/동적 물체를 구분하는 것은 한계가 존재한다.

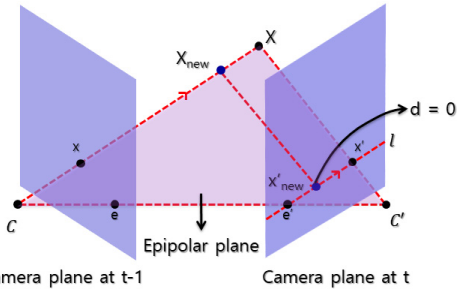


Fig. 3. Limitation of monocular motion detection using Epipolar Geometry

Fig. 2와는 달리, Fig. 3과 같이 3차원 점 X 가 공액면 상에서 이동하였을 경우, 한계점을 확인할 수 있다. 앞서 설명한 것과 마찬가지로 공액면 상에서 이동한 새로운 3차원 점을 X_{new} 로 정의해본다면 t 시간의 영상 평면에 투영된 점 x'_{new} 의 경우 공액선에 투영될 것이다. 즉, 영상 평면에서 투영된 점과 공액선 사이의 거리가 발생하지 않게 되고($d=0$), $t-1, t$ 사이의 시간에서 동적 상태인 점이 정적 상태인 것으로 잘못 추정이 가능할 수 있다.

2.2 제안 방법

2.2.1 정적/동적 상태 구분

앞서 설명했듯이 공액기하를 적용한 스테레오 영상에서의 정적/동적 물체 구분의 한계점을 극복하기 위하여 본 연구에서는 $t-1, t$ 시간 각각의 스테레오 영상을 활용하여 정적/동적 물체를 구분하는 방법을 제안한다.

Fig. 4는 Trifocal Tensor를 이용하여 영상에서의 점의 정적/동적 상태를 구분하는 방법을 보여준다. 카메라의 Pose(Rotation, Translation)를 알고 있다면 $t-1$ 시간에서의 스테레오 영상에 삼각법(Triangulation)을 적용하여 3차원 점 X 를 알 수 있다. 이를 t 시간에서의 스테레오 영상에 투영할 수 있고, x'' 이라는 투영점을 획득할 수 있다. 두 개의 영상 평면에서 두 점(x, x') 연관된

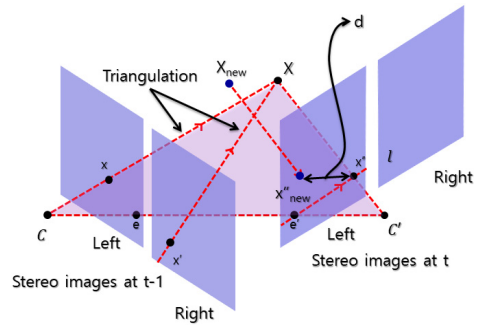


Fig. 4. Static/Dynamic point detection using Trifocal Tensor

종전과는 달리, 제안한 방법은 3개의 영상 평면에서 3개의 점(x, x', x'') 연관되므로 공액기하를 이용한 정적/동적 상태 구분의 한계를 보완할 수 있다. 다시 말하면, 3차원 점 X 가 공액면을 포함한 어느 3차원 좌표를 가지고 있더라도 t 시간일 때의 스테레오 이미지에 정확하게 대응될 수 있다. 이동한 3차원 점 X_{new} 의 t 시간에서의 스테레오 영상 투영점을 x''_{new} , 3차원 점 X 의 t 시간에서의 스테레오 영상 투영점을 x'' 라고 했을 때, 두 투영점 사이의 거리(d) 정보가 측정될 경우 추정점은 동적 상태, 측정 결과가 없다면 정적 상태일 것이다. x''_{new} 는 Eq. (1)과 같이 유도된다.

$$x''_{new} \approx K[R_c^t - R_c^t T_c^t]X \quad (1)$$

Where, K denotes Camera intrinsic matrix, R_c^t denotes Rotation matrix at time t , T_c^t denotes Transition matrix at time t , X denotes reconstructed 3D point at time t

2.2.2 특징점 추적(Tracking)

물체의 정적/동적 상태를 구분하기 위해 제안한 방법은 $t-1, t$ 시간에서의 왼쪽 스테레오 영상에 KLT Tracker를 적용하여 특징점을 획득 및 추적하였다.



Fig. 5. Feature Tracking using KLT Tracker[5]

Fig. 5와 같이 KLT Tracker를 활용하여 영상에서의 코너 특징점들을 추출할 수 있고, 추적에 성공한 점(x_m)을 활용하여 앞서 획득한 x''_{new} 간의 거리 정보 비교를 통한 정적/동적 상태를 파악할 수 있다.

2.2.3 요약

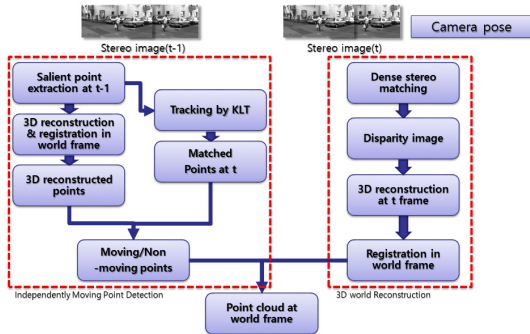


Fig. 6. Summary of Proposed method

제안방법은 Fig. 6과 같이 정리할 수 있다. 우선 t-1 시간의 스테레오 영상을 이용하여 3차원 점을 획득한 후 t 시간대의 스테레오 영상에 투영하여 투영점을 획득하고, KLT Tracker를 이용하여 t-1, t 시간대의 왼쪽 카메라 영상을 이용하여 추적된 점을 투영점과 비교하여 물체의 정적/동적 상태를 구분한다.

2.3 실험결과

검증을 위하여 Fig. 7과 같이 스테레오 영상 시퀀스를 활용하였다. 영상은 KIT에서 제공하는 오픈 데이터셋으로 차량에 탑재된 카메라 pose와 함께 제공된다. 영상에 관한 세부 정보는 Table 1과 같다.



Fig. 7. Dataset[6]

Table 1. Dataset Information

Resolution	1344 × 391 pixels
Length	1424 frames
Frame rate	10 frames per second

추적점 투영점 간 거리 정보를 확인하기 위하여 오차 함수(error function)는 Eq. (2)과 정의한다.

$$e = \|x''_{\neq w} - x_m^t\| \quad (2)$$

Where, $x''_{\neq w}$ denotes expected(projected) point at time t, x_m^t denotes measurement(tracked) point at time t

오차 함수의 값이 0이면 해당하는 점은 현재 정적인 상태일 것이고, 그렇지 않으면 동적 상태임을 확인할 수 있다.

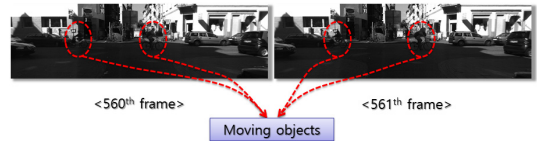


Fig. 8. Example(560th -561th frames) : Two men ride bikes

실험결과 확인을 위하여 예시로 Fig. 8과 같이 영상 데이터셋 중 560번째, 561번째 스테레오 영상을 적용하고 결과를 확인하였다. 선택한 스테레오 영상은 자전거를 타는 두 사람은 동적인 상태이고, 나머지 주변 환경은 정적인 상태이다.



Fig. 9. Result at 560th Frame(2D)

Fig. 9는 제안한 방법을 적용했을 때의 결과를 560번째 영상에 나타난 것이다. 가시성을 높이기 위하여 오차 함수의 값이 크면 빨간색 계열에 가까워지고, 오차 함수의 값이 작을수록 파란색 계열에 가까워지도록 표시하였다. 영상에서 알 수 있듯이, 정적 상태인 건물이나 차의 경우 파란색 계열로 표시된 반면에 자전거를 타고 있는 두 사람은 빨간색 계열로 표시됨을 확인할 수 있다. 즉, 두 사람이 동적 상태로 정상 구분하였음을 나타낸다.

Fig. 10은 스테레오 영상을 활용하여 3차원 지도로 복원한 후 제안한 방법이 적용된 결과이다. 앞서 영상에서 표현된 결과와 마찬가지로 주변 환경은 정적인 상태이며

로 파란색 계열로 표시되고, 동적 상태인 자전거를 타고 있는 두 사람은 빨간색 계열로 표시됨을 확인할 수 있다.

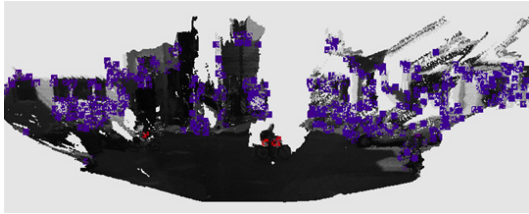


Fig. 10. Result at 560th Frame(3D)

Table 2. Result of performance(Precision, Recall, Accuracy)

		Predicted Result		Recall(%)
		Dynamic	Static	
Actual Result	Dynamic	5	0	100
	Static	1	535	99.81
Precision(%)		83.33	100	-
Accuracy(%)		99.81		

Table 2는 제안한 방법의 성능을 확인하기 위하여 정밀도(Precision), 재현율(Recall), 정확도(Accuracy)를 계산한 결과이다. 정밀도가 재현율 및 정확도에 비해서 낮으나 80% 이상인 점과 실시간으로 계산된 결과임을 고려한다면 자율 주행 차량과 모바일 로봇에 활용 가능한 성능을 보임을 확인할 수 있다.

3. 결론

본 연구에서는 실시간으로 주행하는 차량과 로봇에 도움을 주기 위하여 카메라에서 획득할 수 있는 스테레오 영상을 활용한 정적/동적 물체 구분 방법과 향후 네비게이션 목적으로 활용할 수 있도록 제안한 방법을 스테레오 영상으로 복원된 3차원 지도에 적용한 결과를 보여주었다. 제안한 방법은 기존에 연구되었던 두 개의 영상을 활용하여 물체의 정적/동적 상태 확인 방법에서의 한계점을 보완하기 위하여, 스테레오 영상 3개와 일반적으로 활용되고 있는 추적 알고리즘을 융합하여 실시간으로 정확하게 물체를 추적하고 정적/동적 상태를 구분하는 성능을 보여주었다. 또한, 제안한 방법을 실외 환경에 적용하여 도출된 결과를 미루어 봤을 때 본 연구 결과가 정적

/동적 물체가 다양하고 많은 실외 환경에도 충분히 적용 가능성을 나타낸다. 이러한 결과를 바탕으로 실외 환경에서 자율 주행을 많이 하게 될 모바일 로봇이나 차량에 효과적으로 적용될 수 있을 것으로 예상하며, 향후 카메라를 포함한 다양한 센서가 융합된 시스템 및 알고리즘 하에 다양하게 활용될 수 있을 것이라 기대된다.

References

- [1] E. Mouragnon, M. Lhuillier, M. Dhome, F. Dekeyser, P. Sayd, "Real Time Localization and 3D Reconstruction," *IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, pp. 363-370, 2006. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/CVPR.2006.236>
- [2] H. Lategahn, T. Graf, C. Hasberg, B. Kitt, J. Effertz, "Mapping in dynamic environments using stereo vision," *IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*, pp. 150 - 156, 2011. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/IVS.2011.5940450>
- [3] R. Hartley, A. Zisserman, "Multiple View Geometry in Computer Vision," 2nd ed. Cambridge, U.K.: Cambridge Univ. Press, Mar. 2004.
- [4] J. Klappstein, F. Stein, U. Franke, "Monocular motion detection using spatial constraints in a unified manner," *IEEE Intelligent Vehicles Symposium*, pp.261-267, 2006. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/IVS.2006.1689639>
- [5] B. D. Lucas, T. Kanade, "An iterative image registration technique with an application to stereo vision," *International Joint Conference on Artificial Intelligence*, pp. 674-679, 1981.
- [6] A. Geiger, M. Roser, R. Urtasun, "Efficient large-scale stereo matching," *Asian Conference on Computer Vision(ACCV)*, November 2010. DOI: http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-19315-6_3

서 보 길(Bo-Gil Seo)

[정회원]



- 2011년 8월 : 경북대학교 IT대학 전자공학부(공학사)
- 2013년 8월 : 한국과학기술원 전기 및 전자공학과(공학석사)
- 2013년 12월 ~ 현재 : 국방기술품질원(DTaQ) 연구원

<관심분야>

자율주행, 비전공학, 머신러닝, 유도무기, 신뢰성공학

윤 영 호(Young Ho Yoon)

[정회원]



- 1996년 8월 : 경북대학교 공과대학 전자공학과 (학사)
- 1999년 2월 : 경북대학교 공과대학 전자공학과 (석사)
- 2006년 10월 ~ 현재 : 국방기술품질원(DTaQ) 선임연구원

〈관심분야〉

자율주행, 유도탄, 신뢰성공학

김 규 영(Kyu Young Kim)

[정회원]



- 2013년 2월 : 고려대학교 공과대학 기계공학과(공학사)
- 2018년 12월 ~ 현재 : 국방기술품질원(DTaQ) 연구원

〈관심분야〉

자율주행, 유도무기