

무인 시스템의 자율 주행을 위한 영상기반 항법기술 동향

Survey on Visual Navigation Technology for Unmanned Systems

김현진* · 서호성 · 김표진 · 이충근
서울대학교 기계항공공학부

Hyoun-jin Kim* · Hoseong Seo · Pyojin Kim · Chung-keun Lee

Department of Mechanical and Aerospace Engineering, Seoul National University, Seoul 151-742, Korea

[요 약]

이 논문에서는 영상정보를 기반으로 한 무인 시스템의 자율 항법기술에 대한 동향을 요약한다. 영상기반 항법기술로는 비주얼 서보잉, 비주얼 오도메트리, 영상기반 SLAM(simultaneous localization and mapping)이 있다. 비주얼 서보잉은 목표 이미지와 현재 이미지 사이의 피쳐 차이로부터 원하는 속도 입력을 계산하여 무인 로봇을 목표 자세로 유도하는 데 사용된다. 비주얼 오도메트리는 무인 시스템이 영상정보를 바탕으로 자신의 이동 궤적을 추정하는 기술로, 기존의 dead-reckoning 방식보다 정확성을 향상시킬 수 있다. 영상기반 SLAM은 무인 시스템이 영상 정보를 활용하여 미지의 환경에 대한 지도를 구축함과 동시에 자신의 위치를 결정해 나가는 기술로, 정확히 알지 못하는 환경에서 무인차량이나 무인기를 운용하는데 필수적이다. 이러한 기술들이 적용된 해외의 연구 사례들을 살펴봄으로써 영상기반 항법기술의 동향을 파악할 수 있었다.

[Abstract]

This paper surveys vision based autonomous navigation technologies for unmanned systems. Main branches of visual navigation technologies are visual servoing, visual odometry, and visual simultaneous localization and mapping (SLAM). Visual servoing provides velocity input which guides mobile system to desired pose. This input velocity is calculated from feature difference between desired image and acquired image. Visual odometry is the technology that estimates the relative pose between frames of consecutive image. This can improve the accuracy when compared with the existing dead-reckoning methods. Visual SLAM aims for constructing map of unknown environment and determining mobile system's location simultaneously, which is essential for operation of unmanned systems in unknown environments. The trend of visual navigation is grasped by examining foreign research cases related to visual navigation technology.

Key word : Vision-based navigation, Visual odometry, Visual servoing, Visual simultaneous localization and mapping.

<http://dx.doi.org/10.12673/jant.2015.19.2.133>



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Received 14 April 2015; Revised 14 April 2015
Accepted (Publication) 23 April 2015 (30 April 2015)

*Corresponding Author; Hyoun-jin Kim

Tel: +82-2-880-1552

E-mail: hjinkim@snu.ac.kr

I. 서론

최근 몇 년 동안 무인 시스템에 대한 연구는 국내외를 막론하고 활발히 진행되어, 국토 안보 및 해양 감시/정찰, 항공 촬영, 응급 환자 구조, 미지 지역 탐사, 농약살포 및 화재 진압, 재난 구조 등 다양한 분야에서 무인 로봇이나 무인기의 활용이 추진되어 왔다. 해외에서는 무인기를 활용한 택배 사업에 대한 연구도 활발히 진행 중이어서 무인시스템의 시장성이 새로이 주목을 받고 있다.

하지만, 사용자의 조종을 받는 무인 시스템은 그 활용성에 제한이 있다. 사용자가 무인 시스템의 상태를 실시간으로 확인해야 하며, 조종 가능 범위에서 벗어날 경우 제어 불가능한 무인 시스템이 큰 문제를 일으킬 수 있다. 무인 시스템의 활용성을 크게 증대시키기 위해서는 무인 시스템을 위한 자율 주행 기법이 반드시 개발되어야 한다.

무인 시스템의 제어를 위해서는 기본적으로 자신의 자세에 대한 정보가 필요하다. 사용자의 조종을 받는 무인 시스템의 경우 사용자가 눈으로 무인 시스템의 자세를 확인하였다면, 자율 주행 무인 시스템은 이를 스스로 계산해야 한다. 추가적인 모션 캡처 장비(Vicon) 등을 통해 무인 시스템의 자세 값을 외부에서 제공해 줄 수 있지만, 이는 야외 운행에서는 생각할 수 없는 환경이며, 자율 주행이라 할 수 없다. 결과적으로 이는 무인 시스템이 자체적으로 자신의 자세에 대한 정보를 얻기 위해서 보조적인 센서가 반드시 필요함을 의미한다.

무인 시스템은 자체적으로 부담할 수 있는 하중에 한계가 있기 때문에 무인 시스템에 탑재할 수 있는 센서의 종류는 제한된다. 여러 가지 센서들 중에서 영상 센서는 무게와 가격 대비 획득할 수 있는 정보의 양이 많으며 외부 환경에 영향을 가하는 것 없이 정보만을 취득하는 수동적인 센서다. 이러한 특징으로 인해 영상 센서와 결합된 무인 시스템에 대한 연구가 활발히 진행 중이다.

영상 기반 항법 기술은 크게 맵이 필요 없는 항법(mapless)과 맵을 기반으로 하는 항법(map-based)으로 나뉜다[1]. 맵을 만들지 않는 항법에는 비주얼 서보잉(VS; visual servoing)과 비주얼 오도메트리(VO; visual odometry)가 있다. 맵을 만드는 항법은 다시 맵을 구성하는 항법(map-building)과 맵을 이용하는 항법(map-using)으로 나뉘는데, 대표적으로 영상 기반 슬램(visual SLAM)은 맵을 구성하는 항법에 속한다.

비주얼 서보잉은 주어진 영상 정보를 바탕으로 무인 시스템을 원하는 위치로 이동시키는 기법을 말한다[2]. 카메라의 움직임과 영상에 맺힌 특징점의 움직임 사이의 관계로부터 카메라가 움직여야 할 방향이 결정된다. 무인 시스템이 자율 비행을 하다가 특정한 목적을 수행하기 위해서 반드시 필요한 기술이다.

한편, 연속된 영상으로부터 자신의 위치와 자세를 결정하는 기법을 비주얼 오도메트리라 한다[3]. 비주얼 오도메트리에서는 두 프레임 사이의 특징점 오차 혹은 모든 픽셀의 광도 오차

가 최소가 되는 상대 자세를 찾는 것을 목표로 한다. 비주얼 오도메트리는 계산을 거듭하면서 오차가 계속 누적되는데, 이를 방지하기 위해 GPS나 관성 센서와 함께 사용되기도 한다.

예전에는 공간에 대한 지도 작성 문제와 현재 위치의 결정 문제는 독립적으로 해결해야 될 문제라고 여겨졌지만, 최근 연구를 통해 이는 동시에 풀어야 하는 문제로 재 정의되고, 이를 SLAM이라 한다[4]. SLAM을 통해 미지의 공간에 대한 지도를 작성함과 동시에 구축한 지도에서 현재 자신의 위치를 결정할 수 있다. 최근에는 영상을 활용한 SLAM에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.

본 논문은 다음과 같이 구성되어 있다. 2장에서는 비주얼 서보잉의 알고리즘에 대해 살펴보고, 3장에서는 비주얼 오도메트리에 대해 살펴볼 것이다, 4장에서는 영상 기반 슬램의 종류에 대해서 다룰 것이며, 5장에서는 실제로 영상 기반 항법 기술이 적용된 해외 연구 사례에 대해 다룰 것이다. 마지막으로 6장에서 본 논문의 내용을 요약하였다.

II. 비주얼 서보잉

비주얼 서보잉은 앞서 설명한 듯이 획득한 영상정보를 바탕으로 현재 무인 시스템의 목표 속도를 계산하는 것을 말한다. 이는 결국 현재 이미지와 목표 이미지 사이에서 대응되는 피쳐(feature)오차를 줄이는 것으로 생각할 수 있다. 여기서 피쳐의 거동과 무인 시스템에 장착된 카메라의 움직임 사이에는 밀접한 연관성이 있는데 이를 이미지 자코비안이라 한다[5]. 이에 따라, 피쳐 오차를 줄이도록 하는 카메라의 속도 입력을 계산할 수 있다.

가장 일반적인 비주얼 서보잉에서는 harris corner 등의 특징점의 좌표가 피쳐로 사용된다. 이후에 선, 원, 타원 등의 다양한 기하학적 원형을 사용한 비주얼 서보잉 알고리즘이 개발되었다[6]. 또한, 이후의 연구로 이미지 모멘트와 같은 상위 피쳐를 사용한 비주얼 서보잉이 연구되었다[7]. 이미지 모멘트 기반 비주얼 서보잉은 이미지 평면에 대한 2차원 모멘트를 정의하고 이를 통해 유도된 피쳐들을 사용한다. 2차원 모멘트들 중에서 변환 불변성(translation invariance)이나 회전 불변성(rotation invariance), 혹은 척도 불변성(scale invariance)을 가지는 모멘트를 피쳐로 정의하면, 카메라의 움직임을 병진 운동과 회전 운동으로 구분할 수 있어서 보다 수렴성이 좋은 속도 입력을 계산할 수 있게 된다.

또한, 비주얼 서보잉과 자세 추정 알고리즘을 혼합한 방식도 연구되었다. 처음 이미지와 목표 이미지 사이의 호모그래피 행렬을 계산하고 이를 적절히 분해하면 두 이미지 사이의 회전 행렬과 스케일이 고려되지 않은 이동 벡터를 얻게 된다[8]. 따라서 회전 성분을 따로 고려한 비주얼 서보잉이 가능해진다.

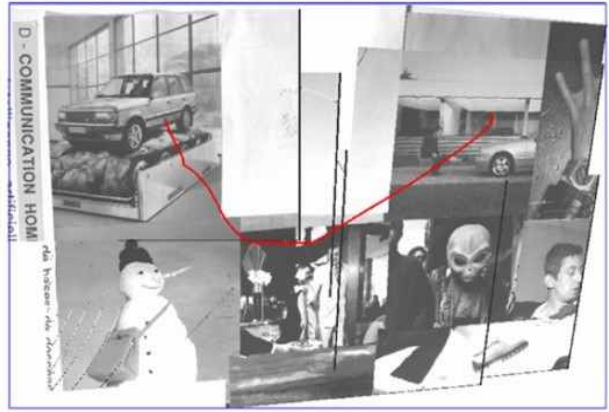


그림 1. 이미지 경로(위)와 추적결과(아래)
Fig. 1. Image path and tracking result.

더불어, 경로계획과 비주얼 서보잉을 결합한 알고리즘도 연구되었다[9]. 스케일이 무시된 공간에서의 경로계획을 통해 원하는 피쳐의 궤적을 포텐셜 함수 혹은 최적화 등의 방법으로 형성하는 것이다. 경로 계획과 결합된 비주얼 서보잉의 경우 피쳐의 궤적을 원하는 목적을 달성하도록 설정할 수 있기 때문에 통상적인 비주얼 서보잉 알고리즘의 단점을 보완하게 된다.

IRISA에서는 이미지로 구성된 위상 지도(topology map)가 주어진 환경에서 영상 기반 비주얼 서보잉을 통해 목표 지점으로 이동하는 연구를 수행하였다[10]. 주어진 처음 이미지와 목표 이미지로부터 두 이미지를 잇는 이미지 경로를 위상 지도로부터 추출하고 이 경로를 추적하도록 하는 카메라 입력을 계산한다. 통상적인 비주얼 서보잉 기법과 달리 이 연구는 주어진 맵을 활용한다는 점에서 맵 기반 항법 기술로 생각할 수 있다.

이외에도, 이미지 전체를 정보로 취급한 엔트로피 기반의 비주얼 서보잉에 관한 연구도 진행되었으며[11], 네비게이션 함수 기반[12] 혹은 커널 함수 기반[13]의 비주얼 서보잉도 존재한다. 또한, 일반화된 카메라 모델에서 이미지 구상의 특징점들로부터 피쳐를 정의하고 비주얼 서보잉을 구현한 알고리즘도 연구되었다[14].

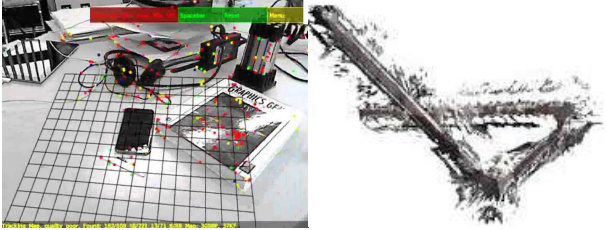


그림 2. PTAM(좌)와 libvso2(위)
Fig. 2. PTAM and libvso2.

III. 비주얼 오도메트리

비주얼 오도메트리란 지상 혹은 공중 로봇이 영상 정보를 바탕으로, 자기 자신의 이동 궤적을 추정하는 기술을 의미한다. 기존의 로봇에서는 관성센서 혹은 휠 엔코더를 이용하여 로봇의 이동 궤적을 추정해왔으나, 바퀴의 미끄러짐 혹은 측정 센서의 노이즈와 같은 오차 요소들로 인하여 그 정확성 및 효용성이 떨어지는 단점을 보여 왔다. 하지만 로봇에 부착된 카메라로부터 들어오는 영상 정보의 경우, 바퀴의 미끄러짐 혹은 센서 노이즈와 같은 오차에 의한 영향을 거의 받지 않기 때문에 기존의 오도메트리 방식보다 더 정확하고 오랜 시간 사용할 수 있는 것으로 알려져 있다. 미국 NASA에서는 행성 탐사 로봇의 영상 기반 자율 항법 장치의 핵심 부분 중 하나로 비주얼 오도메트리 기술을 개발해왔으며, 실제로 Opportunity에 적용되어 화성 내에서 로버의 이동 궤적 추정에 성공적으로 사용된 바 있다[15]. 위와 같은 지상 로봇을 넘어서, 최근에는 실내 및 야외에서 비행하는 무인 시스템의 자동 항법 장치에 적용시키려는 움직임을 보이고 있다 [16],[17].

비주얼 오도메트리는 영상을 처리하는 방식에 따라 크게 세 가지 부류로 나뉠 수 있는데, 첫 번째는 특징점 기반 방법(feature based method), 두 번째는 직접적 영상 밝기 값 기반 방법(appearance based method), 마지막으로 위의 둘의 방법을 혼합한 방법(hybrid method)이다. 대부분의 많은 선행 연구들은 특징점 기반의 비주얼 오도메트리 연구를 수행하고 있다. 특징점 기반의 비주얼 오도메트리 중 가장 널리 알려진 단안 카메라 기반의 PTAM[18]은 매 영상에서 FAST-10 특징점을 추출한 후, 이를 계속 추적한다. 이 때, RANSAC[19]을 사용하여 부정확한 특징점 추적 결과는 최종적으로 사라지게 된다. 정확한 특징점 정합 결과를 기반으로 5-point 문제를 풀어 두 영상이 얻어진 카메라 좌표계 사이의 이동 궤적 및 특징점의 3차원 위치를 추정할 수 있게 된다. 또한 여러 장의 이미지가 얻어진 각각의 카메라의 위치 및 3차원 특징점 좌표 사이의 재투영 오차(reprojection error)를 최소화하기 위해 BA(bundle adjustment)를 사용함으로써 비주얼 오도메트리의 추정 정확도를 더욱 더 높이고 있다[20]. 이외의 다른 특징점 기반 방식들 또한 위와 유사한 과정을 거치며, 양안 카메라를 기반으로 사용할 경우 추가적인 4개 카메라 사이의 기하학적 조건을 이용한다[21]. 이러한

특징점 기반 방식의 장점으로는 계산량이 적기 때문에 실시간성을 확보할 수 있으며, 얻어진 특징점을 바탕으로 주변 환경의 지도를 그려 이를 다시 위치 계산에 활용하기 때문에 SLAM으로의 확장성이 있다는 것이다[22]. 하지만 전체 영상 정보에서 극히 일부분인 100~1000개의 픽셀 정보만을 사용하여 이동 궤적을 추정하기 때문에 비효율적이며, 카메라의 빠른 움직임으로 인한 영상 내에서 흐려지는 현상이 발생하거나 빛이 충분하지 않을 경우 특징점 정합에 실패하여 이동 궤적 추정이 부정확하게 된다는 단점이 있다.

이러한 단점을 극복하기 위해 영상 전체의 광도를 사용하여 카메라의 움직임을 추정하는 기법이 최근 들어 주목받고 있다. 대표적인 연구들로는 DTAM(dense tracking and mapping)[23], KinectFusion[24], 그리고 DVO(dense visual odometry)[25] 등이 있다. ICP(iterative closest point)방식을 이용하여 카메라의 움직임을 추적하는 KinectFusion은 주변의 환경지도를 그리면서 매우 정확하게 카메라의 위치를 추정하지만, 추가적인 그래픽 카드를 이용한 연산을 필요로 하는 단점이 있다. 한편 DVO 및 DTAM의 경우 영상 일관성(photo-consistency) 가정을 기반으로 이미지 배열(image alignment) 문제를 3차원 공간상에서 최적화시킴으로써 카메라의 움직임을 추정하며, 높은 추정 정확도와 실시간성을 보여주었다. 하지만 영상 내의 광도가 크게 변할 경우 매우 불안정한 추정 성능을 보여줌으로써 밝기가 변하는 환경에서는 사용하기 힘들다는 단점이 존재한다.

앞서 소개한 두 방식의 장점을 취한 혼합된 방법의 경우, 아직 많이 연구되지는 않았으나 특징점을 영상 내에서 뽑은 후, 그 주변의 패치들을 바탕으로 direct method에서 사용되었던 image alignment 문제를 풀으로써 카메라의 움직임을 추정한 SVO[26]가 연구되었다.

IV. 영상 기반 SLAM

SLAM은 무인 시스템이 미지의 환경에 대한 지도를 구축하면서 지도상에서 자신의 위치를 동시에 결정해 나가는 과정을 말한다. 주변 환경에 대한 정보를 어떤 센서를 통해 얻느냐에 따라 다양한 종류의 SLAM이 존재하는데, 영상 정보를 기반으로 수행하는 SLAM을 vSLAM, 혹은 visual SLAM이라 한다.

SLAM 문제는 무인 시스템에 가해진 입력과 주변 환경의 관측 값에 대한 확률 모델을 세우는 것에서부터 시작한다. 이에 대한 가장 대표적인 해법은 EKF(extended kalman filter)SLAM이다[27]. EKF-SLAM은 이름에서 알 수 있듯이, 무인 시스템의 운동방정식과 관측 모델 방정식을 현재 시점에서 선형화하여 시간 갱신(time update)와 측정치 갱신(measurement update)을 진행한다. EKF는 적용의 용이성으로 인해 많은 분야에서 이미 널리 사용되어온 추정 방법이므로 SLAM에서도 이러한 장점을 차용하였다. 스테레오카메라를 사용할 경우 관측 지점의 깊이 정보를 관측하여 바로 사용할 수 있지만, 모노카메라의 경우

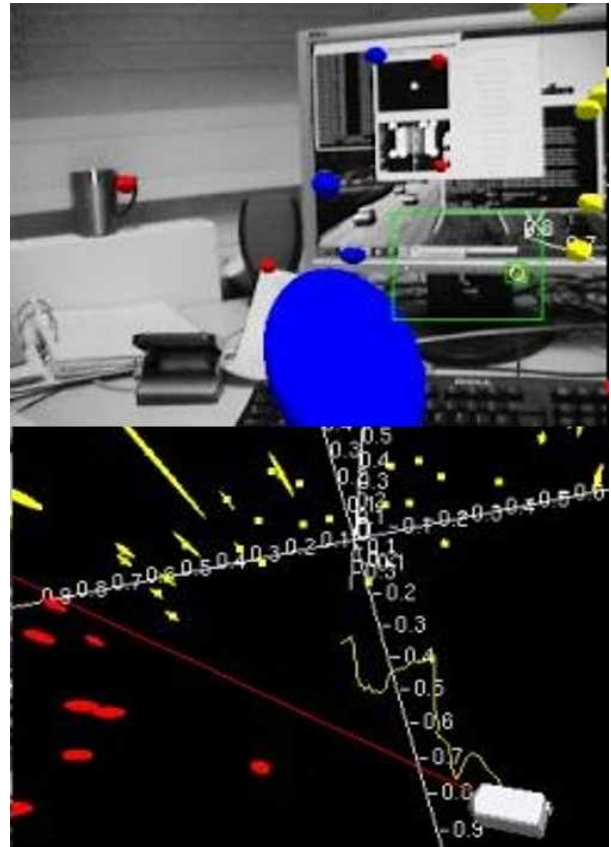


그림 3. 모노SLAM 화면(위)과 거리 불확실성(아래)
 Fig. 3. Image of monoSLAM and depth uncertainty.

거리 정보를 얻을 수 없으므로 거리에 대한 초기화 단계가 필요하다. 거리가 먼 특징점들의 경우 EKF모델에 쓰이는 불확실성을 설정하기가 어려웠으나, inverse-depth 개념이 도입되면서 모든 거리에 대한 불확실성을 가우시안 분포로 표현할 수 있게 되었다[28]. 하지만, inverse-depth 표현법은 특징점의 좌표를 6개의 변수로 나타내야하기 때문에 EKF 상태량 벡터의 크기를 2배로 증가시키게 하였다. 또한, EKF기반의 SLAM에서는 관측 지점이 추가됨에 따라 상태량 벡터의 크기가 계속 증가하기 때문에 계산을 거듭할수록 맵 구성 속도가 현저히 떨어진다. 또한 추가된 관측 지점이 기존의 관측 지점과 일치하는지를 관별하는 data association 문제에 대해서도 취약하다는 단점이 있다[29].

FastSLAM은 EKF-SLAM의 느린 계산 속도에 대한 해결책으로 등장한 SLAM이다[29]. Rao-blackwellization을 통해 무인 시스템의 상태량을 샘플화한다. 여기서 각 샘플이 무인 시스템의 실제 위치 정보를 가진다는 가정을 추가하면, 무인 시스템 관련 상태량의 확률 분포와 맵에 관한 상태량의 확률분포가 서로 독립이 된다. 결국 맵을 독립적인 가우시안들로 표현할 수 있기 때문에 결합분포를 가졌던 이전에 비해 계산 속도가 비약적으로 증가하게 된다[30].

최근에는 이외에도 많은 수의 SLAM 알고리즘들이 연구 중이다. 보로노이 그래프로 맵을 구성하는 SLAM에 관한 연구[31]도 있으며 계층적인 맵을 구성하여 루프 폐쇄(loop-closing)

의 성능을 개선한 연구도 찾아볼 수 있었다[32].

V. 영상 기반 항법 적용 사례

앞서 설명했듯이, 영상 기반 항법 기술이 적용된 무인 시스템에 대한 연구는 활발히 진행 중이다. 본 장에서는 전 세계적으로 대표적인 연구기관 4곳의 연구동향에 대해 살펴볼 것이다.

SRI에서는 GPS없이 외부 환경에서의 장시간 비행에 대한 연구를 수행하였는데, 이 연구는 GPS대신 비행 지역에 대한 3차원 렌더링 모델을 사용한다는 것이 특징이다 (그림4)[33]. 이 연구에서는 두 가지의 정보를 사용한다. 하나는 현재의 화면과 렌더링된 지형 모델 사이의 상관성을 찾는 것이다. 이 상관관계로부터 현재 위치에 대한 전역 정보를 얻게 된다. 비슷한 방식의 다른 연구에서는 2D의 위성사진만을 사용하였기 때문에 이미지만으로 현재 고도에 대한 정보를 얻을 수 없었다[34]. 이에 반해 SRI에서의 연구는 렌더링 사진을 이용함으로써 고도에 대한 추정까지 가능한 것이 특징이다. 다른 정보는 연속된 화면으로부터 자세 정보를 획득하는 것이다. 이 과정은 통상적인 비주얼 오도메트리와 거의 유사하며 렌더링 모델로부터 계산한 자세 결과를 보완해주는 역할을 한다.

DLR에서의 연구는 스테레오 비주얼 오도메트리와 와 IMU 센서를 결합한 연구이다 (그림5)[35]. 임의의 복잡한 환경에서도 영상 기반 항법을 사용할 수 있으며, SfM(structure from motion)을 통해 3차원 공간에 대한 지도를 구축하여 자동으로 무인 시스템의 충돌 회피 경로를 생성한다는 특징이 있다. 모든 계산을 쿼드콥터에 장착된 컴퓨터에서 계산하기 때문에 따로 ground station이 필요하지 않다. 계산 시간을 고려하여 semi-global matching 알고리즘으로 스테레오 이미지를 처리한다.

Munich 대학에서는 모노카메라와 초음파 센서의 결합을 활용한 무인 시스템의 자율 주행에 대해 연구하였다 (그림6)[36]. PTAM(parallel tracking and mapping) 기반의 모노카메라 SLAM을 통해 주변 환경에 대한 맵을 구축하였다. 초음파 센서를 통해 무인 시스템의 높이를 측정하게 되는데, 이 값이 SLAM으로 구축한 맵에 사용되어 맵의 절대적인 metric을 결정할 수 있게 된다. 또한, 데이터 전송에 따른 시간 지연을 고려한 추정 모델과 무인 시스템 제어 입력에 대한 고려도 찾아볼 수 있었다.

Zurich 대학에서는 모노카메라만을 사용한 무인 시스템 자율 항법을 연구하였다 (그림7)[37]. 모노카메라를 사용할 경우 특징점의 거리 정보를 무인 시스템의 움직임에 따른 특징점의 움직임으로부터 추정하게 된다. 이 연구에서는 주변 환경에 따라 최적의 추정 성능을 가지는 경로를 최적화를 통해 계산하였다. SVO와 3D 재구성 알고리즘을 실시간으로 구현하면서 미지의 공간에 대한 맵을 작성하였다. 다른 센서를 사용하지 않고 모노 카메라만을 사용했다는 것이 이 연구의 가장 큰 특징이다.

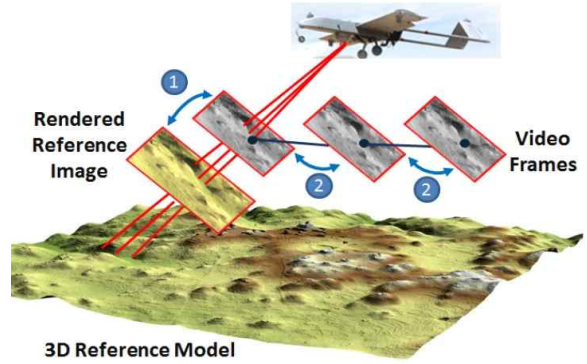


그림 4. 3D 렌더링 모델을 활용한 영상 기반 항법(SRI)
Fig. 4. 3D rendered model based visual navigation (SRI).

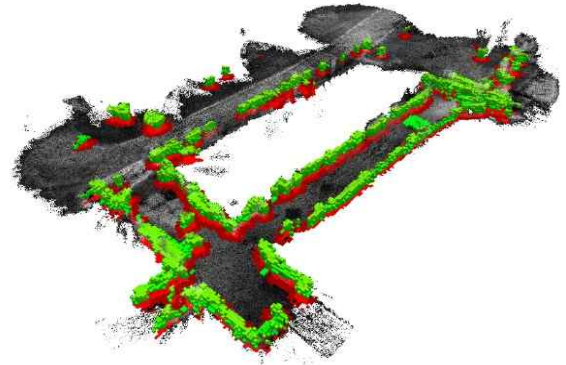


그림 5. SfM으로 재구성된 3차원 공간(DLR)
Fig. 5. 3D reconstruction using SfM(DLR).

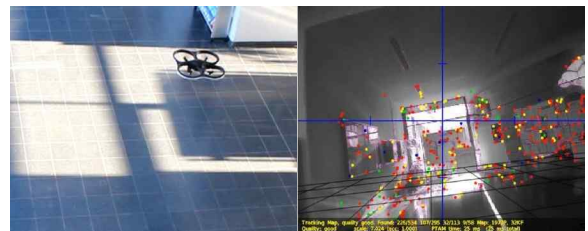


그림 6. PTAM기반의 모노 SLAM(Munich)
Fig. 6. PTAM based monoSLAM(Munich).

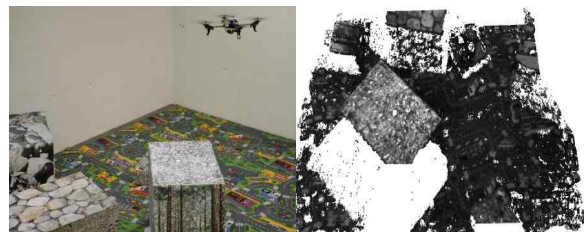


그림 7. 최적 경로를 통한 3차원 재구성 결과(Zurich)
Fig. 7. Reconstruction result using optimal path(Zurich).

VI. 결 론

영상기반 항법 기술은 미래 무인 차량이나 무인기의 자율 주행을 위해 반드시 필요한 기술이다. 본 논문에서는 영상기반 항법 기술을 크게 비주얼 서보잉, 비주얼 오도메트리 그리고 영상기반 SLAM으로 구분하여 각 분야의 연구 주제에 대해 정리하였다. 비주얼 서보잉은 주어진 환경에서 무인 시스템이 특수한 목적을 달성하기 위해 필요한 기술이고, 비주얼 오도메트리는 외부 환경에 대한 무인 시스템의 자세를 추정하는 알고리즘이다. 영상기반 SLAM을 통해서는 미지의 공간에 대한 맵 작성과 동시에 구축한 맵에서 자신의 위치를 결정할 수 있다. 영상기반 항법이 적용된 외국의 사례들을 살펴봄으로써 현재 무인 시스템 항법의 최신 연구 동향을 파악할 수 있었다.

감사의 글

이 논문은 2014년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No.2014034854).

참고 문헌

[1] B. Font, A. Ortiz, and G. Oliver, "Visual navigation for mobile robots: A survey," *Journal of Intelligent and Robotic systems*, Vol. 53, No. 3, pp. 263-296, Nov. 2008.

[2] F. Chaumette and S. Hutchinson. "Visual servo control. I. Basic approaches," *IEEE Robotics & Automation Magazine*, Vol. 13, No. 4, pp. 82-90, Dec. 2006.

[3] D. Scaramuzza, and F. Fraundorfer, "Visual odometry [tutorial]," *IEEE Robotics & Automation Magazine*, Vol. 18, No. 4, pp. 80-92, Dec. 2011.

[4] H. Durrant-Whyte and T. Bailey, "Simultaneous localization and mapping: part I," *IEEE Robotics & Automation Magazine*, Vol. 13, No. 2, pp. 99-110, Jun. 2006.

[5] F. Chaumette and S. Hutchinson. "Visual servo control. ii. advanced approaches [tutorial]," *IEEE Robotics & Automation Magazine*, Vol. 14, No. 1, pp. 109-118, Mar. 2007.

[6] E. Marchand and F. Chaumette, "Feature tracking for visual servoing purposes," *Robotics and Autonomous Systems*, Vol. 52, No. 1, pp. 53-70, Jul. 2005

[7] F. Chaumette, "Image moments: a general and useful set of features for visual servoing," *IEEE Transactions on Robotics*, Vol. 20, No. 4, pp. 713-723, Aug. 2004.

[8] Mariottini, G. Luca, G. Oriolo, and D. Prattichizzo. "Image-based visual servoing for nonholonomic mobile robots using epipolar geometry," *IEEE Transactions on Robotics*, Vol. 23, No. 1, pp. 87-100, Feb. 2007.

[9] Y. Mezouar, and F. Chaumette. "Path planning for robust image-based control," *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol. 18, No. 4, pp. 534-549, Aug. 2002.

[10] A. Remazeilles, and F. Chaumette. "Image-based robot navigation from an image memory," *Robotics and Autonomous Systems*, Vol. 55, No. 4, pp. 345-356, Apr. 2007.

[11] A. Dame, and E. Marchand. "Mutual information-based visual servoing," *IEEE Transactions on Robotics*, Vol. 27, No. 5, pp. 958-969, Oct. 2011.

[12] J. Noah, D. Joel, and E. Koditschek. "Visual servoing via navigation functions," *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol. 18, No. 4, pp. 521-533, Aug. 2002.

[13] V. Kallem et al. "Kernel-based visual servoing," in *IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, Can Diego: CA, pp. 1975-1980, Oct. 2007.

[14] O. Tahri, F. Chaumette, and Y. Mezouar. "New decoupled visual servoing scheme based on invariants from projection onto a sphere," in *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, Pasadena: CA, pp. 3238-3242. May. 2008.

[15] M. Maimone, Y. Cheng, and L. Matthies. "Two years of visual odometry on the mars exploration rovers," *Journal of Field Robotics*, Vol. 24, No. 3, pp. 169-186, Mar. 2007.

[16] H. Albert et al. "Visual odometry and mapping for autonomous flight using an RGB-D camera," in *International Symposium on Robotics Research (ISRR)*, Flagstaff: AZ, pp. 1320-1343, Sep. 2011.

[17] M. Bloesch et al. "Vision based MAV navigation in unknown and unstructured environments," in *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, Anchorage: AK, pp. 21-28, May. 2010.

[18] K. Georg, and D. Murray. "Parallel tracking and mapping for small AR workspaces," in *6th IEEE and ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR)*, Nara: Japan, pp. 225-234, Nov. 2007.

[19] M. Fischler, and R. C. Bolles. "Random sample consensus: a paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography," *Communications of the ACM*, Vol. 24, No. 6, pp. 381-395, Jun. 1981.

[20] M. Kaess, A. Ranganathan, and F. Dellaert. "iSAM: Incremental smoothing and mapping," *IEEE Transactions on Robotics*, Vol. 24, No. 6, pp. 1365-1378, 2008.

[21] A. Geiger, J. Ziegler, and C. Stiller. "Stereoscan: Dense 3d reconstruction in real-time," in *IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*, Baden-Baden: Germany, pp. 963-968, Jun. 2011.

[22] H. Lim et al. "Real-time image-based 6-dof localization in large-scale environments," in *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, Providence: RI, pp.

1043-1050, Jun. 2012.

[23] R. A. Newcombe, S. J. Lovegrove, and A. J. Davison. "DTAM: Dense tracking and mapping in real-time," in *IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV)*, Barcelona: Spain, pp. 2320-2327, Nov. 2011.

[24] R. A. Newcombe et al. "KinectFusion: Real-time dense surface mapping and tracking," in *IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR)*, Basel: Switzerland, pp. 127-136, Oct. 2011.

[25] C. Kerl, J. Sturm, and D. Cremers. "Robust odometry estimation for RGB-D cameras," in *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, Karlsruhe: Germany, pp. 3748-3754, May. 2013.

[26] C. Forster, M. Pizzoli, and D. Scaramuzza. "SVO: Fast semi-direct monocular visual odometry," in *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, Hong Kong: China, pp. 15-22, May. 2014.

[27] J. Fuentes-Pacheco, J. Ruiz-Ascencio and J. Manuel Rendón-Mancha, "Visual simultaneous localization and mapping: a survey," *Artificial Intelligence Review*, Vol. 43, No. 1, pp. 55-81, Jan. 2015.

[28] J. Civera, J. Davison, and J. Montiel. "Inverse depth parametrization for monocular SLAM," *IEEE Transactions on Robotics*, Vol. 24, No. 5, pp. 932-945, Oct. 2008.

[29] T. Bailey, and H. Durrant-Whyte. "Simultaneous localization and mapping (SLAM): Part II," *IEEE Robotics & Automation Magazine*, Vol. 13, No. 3, pp. 108-117, Sep. 2006.

[30] A. Howard, "Multi-robot simultaneous localization and mapping using particle filters," *The International Journal of Robotics Research*, Vol. 25, No. 12, pp. 1243-1256, Dec. 2006.

[31] H. Choset, and K. Nagatani. "Topological simultaneous localization and mapping (SLAM): toward exact localization without explicit localization," *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol. 17, No. 2, pp. 125-137, Apr. 2001.

[32] C. Estrada, J. Neira, and J. D. Tardós. "Hierarchical SLAM: real-time accurate mapping of large environments," *IEEE Transactions on Robotics*, Vol. 21, No. 4, pp. 588-596, Aug. 2005.

[33] H. P. Chiu et al. "Precise vision-aided aerial navigation," in *IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, Chicago: IL, pp. 688-695, Oct. 2014.

[34] F. Lindsten et al. "Geo-referencing for UAV navigation using environmental classification," in *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, Anchorage: AK, pp. 1420-1425, May. 2010.

[35] K. Schmid et al. "Stereo vision based indoor/outdoor navigation for flying robots," in *IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, Tokyo: Japan, pp. 3955-3962, Nov. 2013.

[36] J. Engel, J. Sturm, and D. Cremers. "Scale-aware navigation of a low-cost quadrocopter with a monocular camera," *Robotics and Autonomous Systems*, Vol. 62, No. 11, pp.1646-1656, Nov. 2014.

[37] C. Forster, M. Pizzoli, and D. Scaramuzza. "Appearance based Active, Monocular, Dense Reconstruction for Micro Aerial Vehicle," in *Robotics: Science and Systems Conference*, Berkeley: CA, Jul. 2014.



김 현 진 (Hyoun-Jin Kim)

2001년 12월 : MS/Ph.D, Mech. Eng, University of California, Berkeley
 2002년 1월 ~ 2004년 8월 : Postdoc/Lecturer, Elec. Eng. & Comp. Sci. (EECS), University of California, Berkeley
 2004년 9월 ~ 2009년 3월 : 서울대학교 기계항공공학부 조교수 , 2009년 4월 ~ 2014년 2월 : 서울대학교 기계항공공학부 부교수
 2014년 3월 ~ 현재 : 서울대학교 기계항공공학부 교수
 ※ 관심분야 : 무인기, 지능제어



서 호 성 (Hoseong Seo)

2014년 2월 : 서울대학교 기계항공공학부 (공학사)
 2014년 3월 ~ 현재 : 서울대학교 기계항공공학부 석사과정
 ※ 관심분야 : 영상항법, 지능제어



김 표 진 (Pyojin Kim)

2013년 2월 : 연세대학교 기계공학부 (공학사)
 2013년 3월 ~ 현재 : 서울대학교 기계항공공학부 석박사 통합과정
 ※ 관심분야 : 영상항법, 지능제어



이 충 근 (Chung-Keun Lee)

2014년 8월 : 서울대학교 기계항공공학부 (공학사)
 2014년 9월 ~ 현재 : 서울대학교 기계항공공학부 석박사 통합과정
 ※ 관심분야 : 영상항법, 지능제어