

달 지형 영상에서 특징점 검출 및 정합 기법의 성능 비교 분석

홍성철* · 신후성**

Hong, Sungchul*, Shin, Hyu-Soung**

Comparative Performance Analysis of Feature Detection and Matching Methods for Lunar Terrain Images

ABSTRACT

A lunar rover's optical camera is used to provide navigation and terrain information in an exploration zone. However, due to the scant presence of atmosphere, the Moon has homogeneous terrain with dark soil. Also, in extreme environments, the rover has limited data storage with low computation capability. Thus, for successful exploration, it is required to examine feature detection and matching methods which are robust to lunar terrain and environmental characteristics. In this research, SIFT, SURF, BRISK, ORB, and AKAZE are comparatively analyzed with lunar terrain images from a lunar rover. Experimental results show that SIFT and AKAZE are most robust for lunar terrain characteristics. AKAZE detects less quantity of feature points than SIFT, but feature points are detected and matched with high precision and the least computational cost. AKAZE is adequate for fast and accurate navigation information. Although SIFT has the highest computational cost, the largest quantity of feature points are stably detected and matched. The rover periodically sends terrain images to Earth. Thus, SIFT is suitable for global 3D terrain map construction in that a large amount of terrain images can be processed on Earth. Study results are expected to provide a guideline to utilize feature detection and matching methods for future lunar exploration rovers.

Key words : Lunar rover, Lunar terrain image, Feature detection and matching method, Image matching point

초 록

달 로버의 광학 카메라는 로버의 주행정보와 탐사 지역의 3차원 지형정보를 제공한다. 하지만 대기가 없는 달은 단조로운 지형과 어두운 색조의 토양으로 구성되며, 달의 혹독한 환경에서 로버는 낮은 데이터 저장 용량과 연산 성능을 가진다. 따라서 로버의 안전한 주행과 성공적인 달 탐사를 위해서는 달의 지형 및 환경 특성에 강인한 특징점 검출 및 정합 기법 사용이 검토되어야 한다. 본 연구에서는 달 탐사 로버가 취득한 지형 영상을 대상으로 SIFT, SURF, BRISK, ORB, AKAZE들의 성능을 비교 분석하였다. 실험 결과 SIFT와 AKAZE가 달 지형 특성에 강인한 성능을 보여 주었다. AKAZE는 SIFT에 비해 적은 개수의 영상 정합점들을 검출하였으나, 높은 정확도를 가지며 가장 빠르게 영상 정합점들을 검출하였다. 따라서 정확하고 신속한 연산이 필요한 로버 주행 정보 생성에 적합하다. SIFT는 가장 무거운 연산 속도를 보이나, 가장 많은 영상 정합점들을 안정적으로 검출하였다. 달 탐사 로버는 주기적으로 지형 영상을 지구로 전송한다. 따라서 많은 양의 지형 영상을 처리할 수 있는 지구에서 3차원 지형도 구축을 위해 사용하는 것이 적합하다. 본 연구 결과는 향후 달 탐사 로버에서 특징점 검출 기법들의 활용을 위한 가이드라인을 제공할 수 있을 것으로 기대된다.

검색어 : 달 탐사 로버, 달 지형 영상, 영상 특징점 검출 및 정합 기법, 영상 정합점

* 종신회원 · 교신저자 · 한국건설기술연구원, 미래융합연구본부, 수석연구원, 공학박사
(Corresponding Author · Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology · shong@kict.re.kr)

** 종신회원 · 한국건설기술연구원, 미래융합연구본부, 선임연구위원, 공학박사
(Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology · hyushin@kict.re.kr)

Received April 1, 2020/ revised April 16, 2020/ accepted April 30, 2020

1. 서론

달에 얼음 형태의 물과 희귀자원이 존재하는 것이 밝혀짐에 따라, 한국을 포함한 전 세계 우주 주요국들은 달 착륙선과 로버 중심의 달 탐사를 준비 중이다(Ju, 2016; Kim, 2017; Hong and Shin, 2018). 최근 미국은 상용 달 화물 서비스(Commercial Lunar Payload Service, CLPS)와 아르테미스 계획(Artemis Program)을 발표하여 1970년대 이후 중단되었던 달 탐사 재개를 선언하였고(NASA, 2019; NASA, 2020), 유럽연합은 문 빌리지(Moon Village) 계획을 발표하여 달기지 건설을 위한 국제협력을 제안하였다(ESA, 2016). 중국은 2013년 달 탐사선을 달 바다지역에 안착시켜 1976년 구소련 이후 세 번째로 달 탐사에 성공한 국가가 되었다. 2019부터는 세계 최초로 달 뒷면에 탐사선을 착륙시켜 달 탐사를 수행 중이다(Ju, 2016; Wu et al., 2019). 우리나라도 시험용 달 탐사 궤도선을 2022년에 발사할 예정이며, 2030년까지 달 표면 탐사를 위한 탐사선을 개발 중이다(Kim and Song, 2019).

달 표면은 그동안 궤도선을 이용하여 조사하였다. 달 궤도선은 장기간 동안 달 전역의 표면 탐사가 가능하나(Shin and Hong, 2018), 낮은 해상도를 가지며 달 표면에 국한되기 때문에, 지표면과 지반 구조의 정밀 조사가 가능한 로버가 개발되고 있다(Eom et al., 2012; Hong et al., 2019). 로버 탑재체 중 광학 카메라 시스템은 과학적 탐사뿐만 아니라, 로버 주행과 지형정보 구축을 위해 사용된다. 파노라마 영상은 지구의 원격 조종자가 로버 주변 상황을 효과적으로 파악할 수 있게 한다(Norris et al., 2005). 스테레오 영상 기반의 3차원 지형정보는 지형의 평탄도 및 경사도를 측정할 수 있어 로버가 경제적인 주행을 할 수 있도록 하고(Ahn and Lee, 2008; Lee et al., 2011), 로버 관성항법장치에서 취득된 위치 정보와 함께 전역적인 로버 위치 추정과 3차원 지도 구축을 가능하게 한다(Fuke and Krotkov, 1996; An et al., 2018).

카메라 영상을 이용한 파노라마 영상 생성, 3차원 지도 구축, 로버 주행 거리 측정 등을 위해 다양한 형태의 특징점 추출 및 정합 기법이 개발되어 분석되고 있다. Lee et al.(2013a)과 Tareen and Saleem(2018)은 각기 다른 회전도, 크기, 선명도를 가진 영상을 대상으로 특징점 검출 및 정합 기법들의 성능을 정확도, 반복도, 연산 속도 측면에서 비교 분석하였다. 또한, 터널 내부의 특정 환경에서 강인한 파노라마 영상 생성(Kim et al., 2019), 무인 항공기의 실시간 위치 추적과 영상 정합(Cowan et al., 2016; Lakshmi et al., 2018), 라이더 점군 자료와 광학영상 간 정합(Choi et al., 2019) 등의 목적을 위해 특징점 검출 및 정합 기법들의 성능이 비교 검토되고 있다.

하지만 달 지형은 지구에 비해 단조로운 변화와 색조를 가진다. 대기가 존재하지 않는 달 표면은 지형의 침식 작용이 없고 미미한

지각 활동으로 인해 지형 변화가 단조롭다. 대부분의 달 탐사가 이루어진 달 바다지역은 현무암 재질로 어두운 색조의 토양을 가진다. 또한 달의 극한 환경에서 로버는 지구와의 제한된 통신과 낮은 연산 성능 및 데이터 저장 용량을 가진다. 따라서 달 탐사 로버의 광학 영상 처리를 위해서는 달 지형 특성에 강인하며 정확하고 효율적인 특징점 검출 및 정합 기법 사용이 요구된다. 이에 본 연구에서는 달 지형 영상을 대상으로 특징점 검출 및 정합 기법들의 성능들을 비교 분석함으로써 향후 달 로버 기반의 지형공간정보 구축 기술 개발을 위한 기초 자료로 활용하고자 한다. 이를 위해 중국 달 탐사 로버인 유투 1호(Yutu-1)가 촬영한 달 지형 영상을 사용하였다. 특징점 검출 및 정합 기법들의 성능을 비교 분석하기 위해 검출된 특징점 개수, 특징점 간 정합 정확도, 연산 속도 등을 비교 분석하였다. 마지막으로 성능 분석결과를 토대로 로버의 주행정보와 지형정보를 구축하기 위한 영상 특징점 검출 및 정합 기법들의 활용 방안을 제시하였다.

2. 연구 방법 및 내용

2.1 달 지형 영상

본 연구에서는 달 탐사 로버인 유투 1호의 파노라마 카메라(panoramic camera)가 촬영한 달 지형 영상을 이용하여 영상 특징점 검출 및 정합 기법들의 성능을 분석하였다(Fig. 1). 유투 1호는 1.0 m (W) × 1.5 (L) × 1.1 m (H)의 크기와 140 kg의 무게를 가지며, 6개의 바퀴를 이용하여 최대 20 km/h의 속도로 이동할 수 있도록 제작되었다(Choi et al., 2015). 2013년 12월 달 고요의 바다에 착륙한 유투 1호는 지표 투과 레이더, 알파입자 X 선, 적외선 분광기 등의 장비를 탑재하고 31개월 동안 토양 성분 분석, 지층 구조 조사 등의 탐사임무를 수행하였다. 이중 파노라마 카메라는 50 mm의 초점 거리, 19.7° × 14.5°의 화각을 가지며 2352 × 1728 크기의 칼라 영상을 촬영하고, 1.5 m 높이의 마스트에 탑재되어 탐사 지역의 지형 및 지질학적 특성을 분석하기 위해 사용되었다.

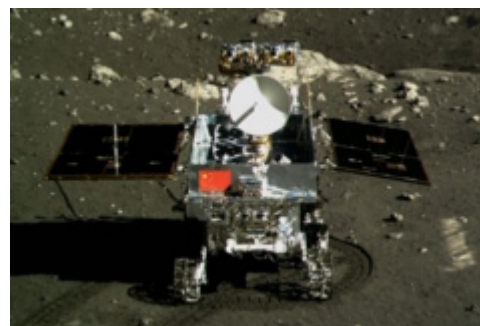


Fig. 1. Yutu-1 (NASA, 2018)

2.2 달 지형 영상에서 특징점 검출 및 정합 기법

달 지형영상의 특징점 추출을 위해 SIFT (Scale-Invariant Feature Transform), SURF (Speed Up Robust Features), BRISK (Binary Robust Invariant Scalable Keypoints), ORB (Oriented FAST and Rotated BRIEF), AKAZE (Accelerated KAZE) 기법들을 사용하였다.

먼저 Lowe(2004)에 의해 제안된 SIFT는 현재까지 가장 강인한 특징점 검출 및 정합 기법으로 알려져 있다. SIFT는 입력 영상으로부터 크기와 선명도가 다른 스케일 공간을 생성하고, DOG (Difference of Gaussian) 연산자를 이용하여 영상 크기와 방향성에 불변하는 특징점을 검출한다. 영상 회전, 시점 변화, 조명 변화, 영상 변형에 강인하다는 장점이 있으나, 높은 연산 비용이 소요되는 단점이 있다(Lee et al., 2013b). SURF는 SIFT와 유사하게 선형 영상 스케일 공간을 생성하여 특징점들을 검출하나, 크기 조절이 가능한 필터와 적분 영상(integral image)을 사용하여 연산 속도를 향상 시켰다(Bay et al., 2008). SURF는 선명도가 낮고 회전된 영상에서 특징점 검출이 용이하나 시점이 다른 영상에는 취약한 단점이 있다(Jung and Yoo, 2015). ORB와 BRISK는 연산 속도가 낮은 SIFT와 SURF의 단점을 개선하기 위해 개발되었다. 이를 위해 ORB는 특징점 추출과 서술자 생성이 빠른 FAST (Features from Accelerated Segment Test)와 BRIEF (Binary Robust Independent Elementary Features)를 이용한다(Rublee et al., 2011). BRISK 또한 FAST를 이용하여 선형 영상 스케일을 생성한다. 회전에 불변하는 특징점 계산을 위해 동심원 기반의 샘플링 패턴을 이용하여 방향성을 계산한다(Leutenegger et al., 2011). ORB와 BRISK는 특징점 검출 속도가 SIFT와 SURF에 비해 빨라 실시간 객체 인식 및 추적이 사용되고 있다. 하지만 영상 간 정합 단계에서 특징점이 많아질수록 연산 속도가 저하되는 단점이 있다(Kim et al., 2012). AKAZE는 KAZE의 연산 속도를 개선하기 위해 개발된 기법으로 FED (Fast Explicit Diffusion)를 사용하여 비선형 스케일 공간을 생성하고 특징점을 추출한다(Alcantarilla et al., 2013). 기존 기법들에 비해 특징점 검출 개수는 적으나 잡음이 많은 영상에 강인한 특징이 있다(Kim et al., 2019).

2.3 달 지형 영상 간 정합점 검출 및 정제

두 장의 지형 영상 간 중첩된 영역으로부터 공통된 특징점, 즉 정합점들을 검출하기 위해 FLANN (Fast Library for Approximate Nearest Neighbors)를 이용하였다. 정합점을 찾는 가장 단순한 방법은 전수조사 방법으로, 한 영상의 특징점 서술자를 선택하고 대응 영상의 특징점 서술자들을 직접 비교하여 찾는 방식이다. 이러한 전수조사 방식은 영상의 크기가 커지고 검출된

특징점 개수가 증가할수록 막대한 연산시간이 소요된다. FLANN은 대용량의 영상을 대상으로 ANN (Approximate Nearest Neighbor)을 이용하여 영상 간 정합점들을 찾아주는 기법이다(Muja and Lowe, 2009). 근사화된 거리 계산방법을 사용하므로 대용량의 영상들로부터 고차원의 정합점들을 빠르게 찾을 수 있다. SIFT, SURF와 같이 문자열 서술자를 가진 특징점들은 유클리디안 거리를 사용하였고, 이진 기술자로 표현된 특징점을 가진 ORB, BRISK, AKAZE는 해밍 거리를 사용하여 정합점들을 찾으려 하였다.

하지만 단조롭고 어두운 색조의 달 지형 영상으로부터 검출된 정합점들은 불일치 점들인 오정합점(outlier)들을 다수 포함할 수 있다. 달 지형 영상으로부터 높은 정확도의 파노라마 영상 생성, 3차원 지도 구축, 로버 주행 거리 측정 등을 위해서는, 정합점으로부터 오정합점들을 제거하고 정상 정합점(inlier)을 찾는 정제과정이 필요하다. 본 논문에서는 호모그래피 모델과 RANSAC (RANDOM SAmple Consensus)을 이용하여 오정합점들을 제거하였다. 호모그래피 모델 계산을 위해 모든 데이터를 이용하는 최소제곱법과는 달리, RANSAC은 최소의 정합점들을 무작위로 추출하고 반복 계산을 통해 정상 정합점 집합을 확장해간다(Fischler and Bolles, 1981). 정합점들은 유도된 모델로부터 일정한 경계값 이내에 존재할 때 정상 정합점으로 분류된다. 경계값은 통계적으로 결정될 수 있고 지형 영상에 따라 임의로 설정할 수 있다.

2.4 달 지형 영상 대상 특징점 검출 및 정합 기법 성능 평가

달 지형 영상에서 특징점 검출 및 정합 기법들의 성능 평가를 위해, 특징점 개수 및 분포, 정상 정합점 개수 및 매칭 정확도, 그리고 연산 시간을 비교 분석하였다. 특징점 개수 및 분포는 달 지형 영상에서 각 검출 기법들의 성능과 특징을 확인하기 위해 분석하였다. 정확도는 두 영상으로부터 검출된 정합점 중 정상 정합점의 비율이다(Eq. (1)). 오정합점은 두 영상 간 대응점들의 일치 여부를 판별하여 계산되어야하나, 어둡고 미세한 크기의 토양과 단조로운 지형 객체로 구성된 달 지형에서 각각의 정합점들을 식별하기는 어렵다. 따라서 RANSAC을 이용하여 정합점들로부터 오정합점들을 제거함으로써 특징점 검출 및 정합 기법들의 정확도를 산출하였다. 마지막으로, 연산 시간은 두 영상의 특징점 검출, 두 영상 간 정합점 검출 및 정제 과정을 포함한다. 성능 분석 결과는 통신 환경이 열악한 달 표면에서 각 기법들의 적용 가능성과 활용 전략을 수립하기 위한 기초자료를 제공하도록 하였다.

$$\text{Precision} = \frac{\text{Number of inliers}}{\text{Number of inliers and outliers}} \quad (1)$$

3. 연구 결과 및 분석

3.1 실험 환경

본 연구에서 특징점 검출 및 정합 기법들(SIFT, SURF, BRISK, ORB, AKAZE)은 Python 3.5와 OpenCV 4.1을 이용하여 구현하였고, 실험은 Intel (R) Core (TM) i7-4700 HQ CPU @ 2.40 GHz X 8, 16 GB RAM 사양의 Ubuntu 16.04 (64 bit) 환경에서 수행하였다. 특징점 검출 기법 중 ORB는 최대 특징점 검출 개수를 조정할 수 있다. 500개로 설정된 초기 값을 10만개로 변경하여 충분한 개수의 특징점들을 검출하도록 하였다. 또한 RANSAC의 경계값과 반복 횟수를 각각 0.1과 10,000으로 설정하여 정합점들을 엄밀히 정제할 수 있도록 하였다. 본 연구에서는 달 지형 영상을 평탄 지역, 바위 지역, 크레이터 지역, 로버 궤적 지역으로 분류하였다(Fig. 2). 평탄 지역은 어두운 색조와 미세한 크기의 토양으로 구성되며 식별 가능한 지형 객체 개수가 상대적으로 적다. 바위 및 크레이터 지역은 돌, 자갈 등의 지형 객체들과 기복이 있는 지형으로 구성된다. 마지막으로 로버 궤적지역은 로버가 주행한 지역으로 인위적으로 생성된 바퀴 궤적을 보여준다.

3.2 실험 결과 및 분석

3.2.1 영상 특징점 검출 개수 및 분포 분석

Table 1은 특징점 검출 및 정합 기법의 지형영상 적용 결과를 정량적으로 보여준다. 특징점 검출 기법들은 공통적으로 지형 복잡도가 높은 로버 궤적 영상에서 가장 많은 특징점을 검출하였으며, 단조로운 지형인 평탄 지역에서 가장 적은 개수의 특징점을 검출하였다. 평균적으로 BRISK와 ORB가 가장 많은 개수의 특징점을 검출하였고, 가장 적은 개수의 특징점을 검출한 기법은 AKAZE이다. 또한 칼라 영상 정보를 이용하는 SIFT가 회색조의 영상 정보를 이용하는 SURF보다 많은 특징점을 검출하였다. Table 2는 Fig. 2의 좌측 지형영상에 특징점 검출 기법들을 적용한 결과로, 녹색으로 표시된 특징점들의 개수와 분포를 보여준다. SIFT, SURF,

AKAZE는 지형 특징점들을 영상 전반에 걸쳐 고르게 검출하였고, 특징점 밀도 역시 검출 개수에 따라 완만히 변하는 것을 알 수 있다. FAST 기반의 BRISK와 ORB는 다른 기법보다 많은 개수의 특징점들을 검출하였으나, 검출된 특징점들은 산발적으로 분포하는 경향을 보인다. 특히 ORB에 의해 검출된 특징점들은 모든 종류의 영상에서 특정 객체를 중심으로 군집되어 있는 경향을 명확히 보여준다.

3.2.2 영상 정합점 검출 및 연산 시간 분석

달 지형에서 특징점 검출 및 정합 기법들의 정합점 검출 성능을 평가하기 위해, Table 1의 정합점 개수와 정확도를 비교 분석하였다. Table 3은 RANSAC에 의해 검출된 정합점들을 달 지형 영상과 같이 보여주고 있다. 평균 2,544개의 정합점들을 검출한 SIFT는 모든 종류의 지형 영상에서 가장 많은 개수의 정합점들을 검출하였다. SIFT의 평균 정확도는 0.1129로 두 번째로 높으나, 단조로운 평탄 지역에서는 가장 높은 정확도(0.0151)로 정합점들을 검출하여, 달 지형에서 가장 좋은 영상 정합점 검출 성능을 보여 주었다. AKAZE는 가장 높은 평균 정확도(0.1167)를 보여주었다. SIFT에 이어 두 번째로 많은 평균 정합점(944)들을 검출하였고, 평탄 지역을 제외한 모든 지형에서 가장 높은 정확도의 정합점들을 검출하였다. SURF, BRISK, ORB는 달 지형 특성에 취약한 정합점 검출 성능을 보여 주었다. 특히, ORB는 지형 영상들로부터 가장 많은 특징점들을 검출하였으나, 가장 낮은 평균 정확도(0.0087)와 정합점 검출 개수(155)를 보여주고 있다.

단조로운 달 지형 특성으로 인해 특징점 검출 및 정합기법들은 지형 복잡도에 따라 높은 편차의 정합점 검출 성능을 보이고 있다. 지형 복잡도가 높은 로버 주행 지역에서 SIFT는 0.2433의 정확도로 6,172개의 정상 정합점들을 검출하였으나, 평탄 지역에서는 0.0151의 낮은 정확도로 282개의 정상 정합점들을 검출하였다. SIFT와 함께 높은 정확도를 보인 AKAZE는 로버 주행 지역에서 0.2537의 정확도로 2,674개의 정합점들을 검출하였다. 하지만 평탄 지역에서

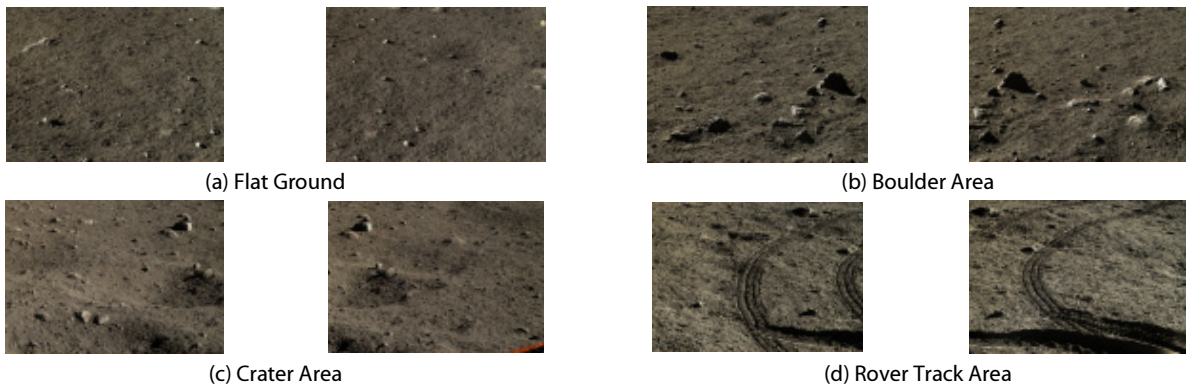


Fig. 2. Lunar Terrain Image Sets from Yutu-1 (The Planetary Society, 2016)

Table 1. Quantitative Comparison of Feature Point Detection and Matching Results

	Algorithm	Feature Point (Number)		Features Matched with RANSAC (Number)	Precision	Computation Time (sec)
		Left Image	Right Image			
Flat Ground	SIFT	82,211	73,872	282	0.0151	505.06
	SURF	47,846	46,358	51	0.0093	119.38
	ORB (100000)	100,000	99,394	37	0.0031	17.36
	BRISK	72,382	59,715	56	0.0062	18.15
	AKAZE	19,351	15,551	41	0.0107	2.47
Boulder Area	SIFT	85,063	84,896	2,413	0.1255	600.72
	SURF	51,202	50,691	386	0.0448	120.43
	ORB (100000)	100,000	100,000	204	0.0110	17.19
	BRISK	105,149	101,639	527	0.0344	48.11
	AKAZE	23,657	24,016	740	0.1275	3.84
Crater Area	SIFT	78,570	89,838	1,310	0.0678	588.24
	SURF	48,971	51,048	198	0.0248	114.83
	ORB (100000)	99,765	100,000	163	0.0083	18.36
	BRISK	84,325	93,157	335	0.0227	35.34
	AKAZE	17,418	19,120	320	0.0746	2.77
Rover Track Area	SIFT	103,766	98,598	6,172	0.2433	860.16
	SURF	52,197	51,007	738	0.0799	124.14
	ORB (100000)	100,000	100,000	216	0.0125	17.39
	BRISK	175,053	197,042	1,187	0.0419	183.38
	AKAZE	42,268	44,686	2,674	0.2537	9.31
Average	SIFT	87,403	86,801	2,544	0.1129	638.54
	SURF	50,054	49,776	343	0.0397	119.69
	ORB (100000)	99,941	99,849	155	0.0087	17.57
	BRISK	109,227	112,888	526	0.0263	71.24
	AKAZE	25,674	25,843	944	0.1167	4.60

Table 2. Feature Detection Results from Left Terrain Images


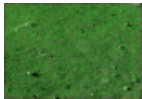

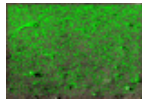



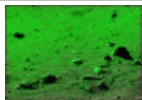
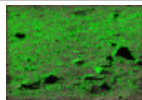

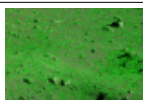
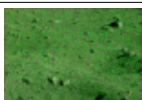
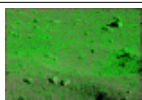
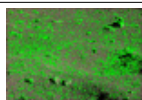

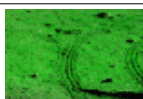
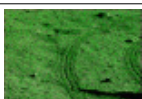
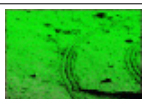
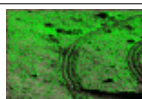






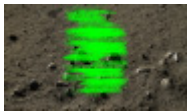









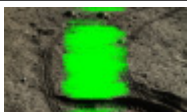
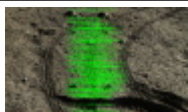
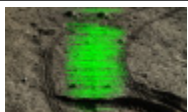

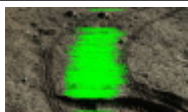
	SIFT (Feature Point Number)	SURF (Feature Point Number)	BRISK (Feature Point Number)	ORB (100,000) (Feature Point Number)	AKAZE (Feature Point Number)
Flat Ground					
	(82,211)	(47,846)	(72,382)	(100,000)	(19,351)
Boulder Area					
	(85,063)	(51,202)	(105,149)	(100,000)	(23,657)
Crater Area					
	(78,570)	(48,971)	(84,325)	(99,765)	(17,418)
Rover Track Area					
	(103,766)	(52,197)	(175,053)	(100,000)	(42,268)

Table 3. Feature Point Matching Results with RANSAC

	SIFT (Inlier Number, Precision)	SURF (Inlier Number, Precision)	BRISK (Inlier Number, Precision)	ORB (100,000) (Inlier Number, Precision)	AKAZE (Inlier Number, Precision)
Flat Ground					
	(282, 0.0151)	(51, 0.0093)	(56, 0.0062)	(37, 0.0031)	(41, 0.0107)
Boulder Area					
	(2,413, 0.1255)	(386, 0.0448)	(527, 0.0344)	(204, 0.0110)	(740, 0.1275)
Crater Area					
	(1,310, 0.0678)	(198, 0.0248)	(335, 0.0227)	(163, 0.0083)	(320, 0.0746)
Rover Track Area					
	(6,172, 0.2433)	(738, 0.0799)	(1,187, 0.0419)	(216, 0.0125)	(2,674, 0.2537)

의 정확도와 정합점 검출 개수는 각각 0.0107과 41개로 로버 주행 지역에 비해 현저히 낮은 검출 성능을 보여 주었다. Table 1의 연산 시간은 두 영상에서의 특징점 추출, 영상 간 정합점 검출, RANSAC 기반 정합점 정제 과정들을 포함한다. AKAZE의 평균 연산 속도는 4.60초로 높은 정확도로 가장 빠르게 정합점들을 검출하였다. SIFT는 가장 강한 정합점 검출 성능을 보여 주었으나, 평균 638.54초로 가장 무거운 연산 속도를 보여 주고 있다. SURF는 평균 119.69초로 두 번째로 긴 시간을 소요하였다. BRISK와 ORB는 각각 평균 71.24초와 17.57초의 시간을 소요하였다. 특히, ORB는 지형 영상의 종류와 관계없이 균일한 연산 속도를 보여 주고 있다.

4. 결론

본 연구에서는 SIFT와 AKAZE가 달 지형 특성에 강한 정합점 검출 성능을 보여주고 있다. AKAZE는 SIFT 보다 적은 개수의 영상 정합점들을 검출하나, 상대적으로 높은 정확도와 가장 빠른 속도로 정합점들을 검출하였다. SIFT는 무거운 연산 속도를 보여주고 있다. 하지만 AKAZE와 근사한 정확도를 가지며 모든 종류의 지형 영상에서 가장 많은 개수의 정합점을 안정적으로 검출 하였다. 달의 혹독한 환경(주야간의 높은 온도 편차, 달 미세 먼지, 우주 방사능 등)에서 로버는 연산 능력보다는 내구성이 높은 전산 장치를 사용한다. 따라서 지형의 평탄도 및 경사도 계산, 파노라마 영상과

같은 로버 주행정보 생성을 위해서는 정확하고 신속한 연산이 가능한 AKAZE가 적합하다. 탐사 지역의 전역적인 3차원 지형정보 구축은 막대한 용량의 데이터와 함께 높은 연산 능력이 필요하다. 로버는 지형 영상을 포함한 탐사 자료를 주기적으로 지구로 전송한다. 전역적인 3차원 지도는 지구에서 구축이 가능하므로, 높은 정확도와 충분한 개수의 영상 정합점 검출 성능을 보인 SIFT를 사용하는 것이 적합하다.

본 연구에서는 달 지형 영상을 이용하여 영상 특징점 검출 및 정합 기법 성능을 비교 분석 하였고, 향후 달 탐사 로버에서의 활용 가능성을 검토 하였다. 하지만 현재 달 표면에서의 로버 탐사는 특정 국가에 의해 수행되고 있어, 다양한 달 지형 영상을 취득하기 어렵다. 따라서 달 탐사 로버 기반의 주행 및 지형 정보 구축 기술을 개발하기 위해서는, 다양한 달 지형 모사가 가능한 시험 부지 구축이 필요할 것으로 사료된다. 또한 얼음 형태의 물이 존재하는 것으로 알려진 달 영구음영지역(permanently shadowed region) 탐사를 위해서는, 달 지형 특성뿐만 아니라 저도도 환경에서도 강한 영상 특징점 검출 및 정합 기법 개발이 필요하다.

감사의 글

본 논문은 한국건설기술연구원 주요사업으로 지원을 받아 수행된 연구(극한건설 환경구현 인프라 및 TRL6 이상급 극한건설 핵심기술 개발)로 이에 감사합니다.

References

- Ahn, M. S. and Lee, Y. G. (2008). "Trend of rover development and mission analysis of lunar exploration rovers." In *Proceedings of The Korean Society For Aeronautical And Space Sciences*, Korea, pp. 1301-1304 (in Korean).
- Alcantarilla, P. F., Nuevo, J. and Bartoli, A. (2013). "Fast explicit diffusion for accelerated features in nonlinear scale spaces." In *Proceedings of British Machine Vision Conference*, Bristol, United Kingdom, pp. 13.1-13.11.
- An, P., Liu, Y., Zhang, W. and Jin, Z. (2018). "Vision-based simultaneous localization and mapping on lunar rover." In *Proceedings of IEEE 3rd International Conference on Image, Vision and Computing*, Chongqing, China, pp. 487-493.
- Bay, H., Tuytelaars, T. and Gool, L. V. (2008). "SURF: Speeded up robust features." *Computer Vision and Image Understanding*, Vol. 110, No. 3, pp. 346-359.
- Choi, S., Lee, D., Bae, J., Ryu, D., Ju, G. and Sim, E. (2015). "Introduction to Chang'e-3 and Analysis of Estimated Mission Trajectory" *The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences*, Vol. 43, No. 11, pp. 984-997, DOI: <http://dx.doi.org/10.5139/JKSAS.2015.43.11.984> (in Korean).
- Choi, Y. J., Mohammad, G. F., Hong, S. H. and Shon, H. G. (2019). "Feature-based matching algorithms for registration between LiDAR point cloud intensity data acquired from MMS and image data from UAV." *Journal of the Korean Society of Surveying, Geodesy, Photogrammetry and Cartography*, Vol. 37, No. 6, pp. 453-464, DOI: <https://doi.org/10.7848/ksgepc.2019.37.6.453> (in Korean).
- Cowan, B., Imanberdiyev, N., Fu, C., Dong, Y. and Kayacan, E. (2016). "A performance evaluation of detectors and descriptors for UAV visual tracking." In *Proceedings of 14th International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision*, Phuket, Thailand, pp. 1-6.
- Eom, W. S., Kim, Y. G., Lee, J. H., Choi, G. H. and Sim, E. S. (2012). "Development trends of unmanned planetary exploration rover by NASA." *Current Industrial and Technological Trends in Aerospace*, Vol. 10, No. 2, pp. 102-111. (in Korean).
- European Space Agency (ESA) (2016). *Moon village: A vision for global cooperation and space 4.0*, Available at: https://www.esa.int/About_Us/Ministerial_Council_2016/Moon_Village (Accessed: March 4, 2020).
- Fischler, M. A. and Bolles, R. C. (1981). "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.
- Fuke, Y. and Krotkov, E. (1996). "Dead reckoning for a lunar rover on uneven terrain." In *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Vol. 1, Minneapolis, USA, pp. 411-416.
- Hong, S. C. and Shin, H. S. (2018). "Trend analysis of lunar exploration missions for lunar base construction." *Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society*, Vol. 19, No. 7, pp. 144-152, DOI: <https://doi.org/10.5762/KAIS.2018.19.7.144> (in Korean).
- Hong, S. C., Chung, T. I. Park, J. M. and Shin, H. S. (2019). "Research on development of construction spatial information technology, using rover's camera system." *Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society*, Vol. 20, No. 7, pp. 630-637, DOI: <https://doi.org/10.5762/KAIS.2019.20.7.630> (in Korean).
- Ju, G. H. (2016). "Development status of domestic & overseas space exploration & associated technology." *Journal of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences*, Vol. 44, No. 8, pp. 741-757, DOI: <https://doi.org/10.5139/JKSAS.2016.44.8.741> (in Korean).
- Jung, H. J. and Yoo, J. S. (2015) "Feature matching algorithm robust to viewpoint change." *Journal of Korea Institute of Communication Sciences*, Vol. 40, No. 12, pp. 2363-2371, DOI: <http://dx.doi.org/10.7840/kics.2015.40.12.2363> (in Korean).
- Kim, K. J. (2017). "A research trend on lunar resource and lunar base." *The Journal of the Petrological Society of Korea*, Vol. 26, No. 4, pp. 373-384, DOI: <https://doi.org/10.7854/JPSK.2017.26.4.373> (in Korean).
- Kim, S. J., Lee, S. W. and Seo, D. M. (2019). "A comparative analysis of image feature extraction algorithm for generation of panorama images in tunnel." In *Proceedings of The Korean Institute of Information Scientists and Engineers*, pp. 1409-1411.
- Kim, S. R., Yoo, H. J., Sohn, K. H. (2012). "FAST and BRIEF based real-time feature matching algorithms." In *Proceedings of Spring Conference on Korean Institute of Broadcast and Media Engineers*, pp. 1-4 (in Korean).
- Kim, Y. R. and Song, Y. J. (2019). "Observational arc-length effect on orbit determination for Korea pathfinder lunar orbiter in the earth-moon transfer phase using a sequential estimation." *Journal of Astronomy and Space Sciences*, Vol. 36, No. 4, pp. 293-306.
- Lakshmi, M. D., Mirunalini, P., Priyadharsini, R. and Mirmalinee, T. T. (2018). "Review of feature extraction and matching methods for drone image stitching." In *Proceedings of International Conference on ISMAC in Computational Vision and Bio-Engineering*, Palladam, India, pp. 595-602.
- Lee, T. J., Jang, B. M., Lee, D. H., Han, K. M., Park, K. S. and Cho, D. I. (2013a). "Performance evaluation of various feature detector & descriptor algorithms." In *Proceedings of Institute of Control, Robotics and Systems*, pp. 381-382.
- Lee, W. B., Ju, G. H., Choi, G. H. and Sim, E. S. (2011). "Development trends of space robots." *Current Industrial and Technological Trends in Aerospace*, Vol. 9, No. 2, pp. 158-175 (in Korean).
- Lee, Y. H., Park, J. H. and Kim, Y. S. (2013b). "Comparative analysis of the performance of SIFT and SURF." *Journal of the Semiconductor & Display Technology*. Vol. 12, No. 3. pp. 59-64. (in Korean).
- Leutenegger, S., Chli, M. and Siegwart, R. Y. (2011). "BRISK: Binary robust invariant scalable keypoints." In *Proceedings of International Conference on Computer Vision*, Barcelona, Spain, pp. 2548-2555.
- Lowe, D. G. (2004). "Distinctive image features from scale invariant keypoints." *International Journal of Computer Vision*, Vol. 60, No. 2, pp. 91-110.

- Muja, M. and Lowe, D. G. (2009). "Flann, fast library for approximate nearest neighbors." *In Proceedings in International Conference on Computer Vision Theory and Applications*, Lisboa, Portugal, pp. 331-340.
- NASA (2018). *Yutu*, Available at: <https://solarsystem.nasa.gov/missions/yutu/in-depth/> (Accessed: March 2, 2020).
- NASA (2019). *Commercial lunar payload services*, Available at: <https://www.nasa.gov/content/commercial-lunar-payload-services> (Accessed: March 3, 2020).
- NASA (2020). *Artemis*, Available at: <https://www.nasa.gov/artemis-program> (Accessed: March 3, 2020).
- Norris, J. S., Powell, M. W., Vona, M. A., Backes, P. G. and Wick, J. V. (2005). "Mars exploration rover operations with the science activity planner." *In Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Barcelona, Spain, pp. 4618-4623.
- Rublee, E., Rabaud, V., Konolige, K. and Bradski, G. (2011). "ORB: An efficient alternative to SIFT or SURF." *Proceedings of International Conference on Computer Vision*, Barcelona, Spain, pp. 2564-2571.
- Shin, H. S. and Hong, S. C. (2018). "A deep-learning based automatic detection of craters on lunar surface for lunar construction." *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, KSCE, Vol. 38, No. 6, pp. 859-865, DOI: <https://doi.org/10.12652/Ksce.2018.38.6.0859> (in Korean).
- Tareen, S. A. K. and Saleem, Z. (2018). "A comparative analysis of sift, surf, kaze, akaze, orb, and brisk." *In Proceedings of International conference on computing, mathematics and engineering technologies*, Sukkur, Pakistan, pp. 1-10.
- The Planetary Society (2016). *Chang'e 3 data: Rover panoramic camera (PCAM)*, Available at: <http://planetary.s3.amazonaws.com/data/change3/pcam.html> (Accessed: February 10, 2020).
- Wu, W., Li, C., Zuo, W., Zhang, H., Liu, J., Wen, W., Su, Y., Ren, X., Yan, J., Yu, D., Dong, G., Wang, C., Sun, Z., Liu, E., Yang, J. and Ouyang, Z. (2019). "Lunar farside to be explored by Chang'e-4." *Nature Geoscience*, Vol. 12, No. 4, pp. 222-223.