

# 극한지 탐사 로버의 카메라 시스템 설계를 위한 시뮬레이션 기법 개발

김창재<sup>1</sup>, 박재민<sup>2</sup>, 최강혁<sup>1</sup>, 신휴성<sup>3</sup>, 홍성철<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup>명지대학교 토목환경공학과, <sup>2</sup>한국건설기술연구원 혁신전략실, <sup>3</sup>한국건설기술연구원 미래융합연구본부

## Development of Simulation Method to Design Rover's Camera System for Extreme Region Exploration

Changjae Kim<sup>1</sup>, Jaemin Park<sup>2</sup>, Kanghyuk Choi<sup>1</sup>, Hyu-Soung Shin<sup>3</sup>, Sungchul Hong<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Civil and Environmental Engineering, Myongji University

<sup>2</sup>Innovation and Strategy Division, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology

<sup>3</sup>Department of Future Technology and Convergence Research, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology

**요약** 극한환경 지역에서 무인 로버는 다수의 센서와 장비를 탑재하고 인간을 대신해 장기간 탐사 임무를 수행하기 위해 개발된다. 하지만 혹독한 기상과 거친 지형조건을 가진 극한환경 지역에서 로버 카메라 영상은 제한된 가시거리와 시야각을 가지므로, 카메라들은 안전한 원격 주행과 효율적 지형정보 구축을 위해 배치되어야 한다. 이에 본 연구에서는 로버 설계 도면을 기반으로 한 카메라 배치 시뮬레이션을 수행함으로써, 향후 로버 카메라 시스템 제작을 위한 시간과 비용을 최소화 하고자 하였다. 제안한 로버의 카메라 시스템은 총 8대의 카메라가 탑재되며, 기능적 요건에 따라 탐사 및 주행 카메라로 분류 된다. 카메라 배치 시뮬레이션에서는 카메라들의 위치와 경사 각도를 변경하여 가상의 지형을 촬영한다. 로버 카메라의 최적 배치는 가상 지형영상의 가시거리 및 중첩도, 지형 데이터의 정확도 등을 비교 및 분석하여 결정하였다. 카메라 배치 시뮬레이션 결과는 실제 로버 제작에 반영될 예정으로, 향후 극한환경지역을 모사한 모의 지형을 구축하고 로버 성능을 종합적으로 평가하여 로버 카메라 시스템의 성능을 개선할 예정이다.

**Abstract** In extreme environment regions, unmanned rovers equipped with various sensors and devices are being developed for long-term exploration on behalf of humans. On the other hand, due to the harsh weather conditions and rough terrain, the rover camera has limited visible distance and field of view. Therefore, the rover cameras should be located for safe navigation and efficient terrain mapping. In this regard, to minimize the cost and time to manufacture the camera system on a rover, the simulation method using the rover design is presented to optimize the camera locations on the rover efficiently. In the simulation, a simulated terrain was taken from cameras with different locations and angles. The visible distance and overlapped extent of camera images, and terrain data accuracy calculated from the simulation were compared to determine the optimal locations of the rover's cameras. The simulated results will be used to manufacture a rover and camera system. In addition, self and system calibrations will be conducted to calculate the accurate position of the camera system on the rover.

**Keywords** : Extreme Environment Region, Unmanned Rover, Camera System, Camera Location Simulation, Exploration

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

\*Corresponding Author : Sungchul Hong(Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology)  
email: shong@kict.re.kr

Received September 23, 2019

Revised October 16, 2019

Accepted December 6, 2019

Published December 31, 2019

## 1. 서론

지구의 남북극, 재난재해 지역, 우주 행성 표면 같이 인간의 접근이 어려운 극한환경지역에서 무인 로버는 다양한 센서와 장비를 탑재하고 다양한 임무를 수행하고 있다 [1-3]. 육상과 해상의 상호 작용으로 지형 변화가 심하고 균열이 빈번한 남극에서 로버는 운송로 확보를 위한 크레바스 탐사, 빙봉의 지형학적 변화 분석 등에 활용되고 있으며 [4,5], 원자력 발전소 사고 지역에서는 시설물 피해 상황 파악과 방사능 계측 등의 활동을 위해 이용된다 [6,7]. 달과 화성에서는 우주의 기원과 진화를 밝히기 위한 과학적 연구를 위해 행성 표면의 지형, 지질, 및 광물 탐사 등의 임무를 수행하고 있다 [8,9].

극한환경지역에서 무인 로버는 안전성 확보를 위해 느린 속도로 주행하며, 관측 데이터를 원격지로 전송한다. 이중 카메라는 로버의 원격 주행과 지형정보 구축을 위한 영상을 제공한다. 하지만 거칠고 장애물이 많은 미개척지에서 로버의 조작은 카메라의 제한된 시야각과 영상 송수신의 지연 등으로 인해 많은 제약이 있다 [10]. 또한 로버 탐사 경로는 위성 영상, 항공사진 등의 지형 정보를 이용하여 수립될 수 있으나 미개척지의 지형 정보는 보통 낮은 해상도를 가지며 최신 지형정보를 반영하지 못하므로 [11, 12], 로버는 주변 장애물을 인식함으로써 세부 탐사 경로를 수립해야 한다.

극한환경지역에서 로버는 카메라, 시추장비, 분광기 등을 탑재하고 탐사 임무를 수행한다. 이중 카메라는 활용 목적에 따라 장비 카메라, 주행 카메라, 탐사 카메라 등으로 구분되며, 로버의 장비 조작, 로버 주행과 지형정보 취득을 위한 영상을 제공한다. 하지만 로버 탑재 카메라는 로버 크기 및 종류, 그리고 기능 요건에 따라 다양한 개수와 형태를 가진다. 이러한 로버 카메라의 배치는 탑재 카메라의 위치와 각도를 반복적으로 변화시키고 취득 영상을 분석함으로써 결정할 수 있으나 많은 시간과 비용이 소요된다 [13-15].

이에 본 연구에서는 로버 카메라의 배치를 결정하기 위해, 로버 개념 설계를 기반으로 한 카메라 배치 시뮬레이션을 수행하였다. 제한한 로버의 카메라 시스템은 6대의 주행 카메라와 2대의 마스트 카메라로 구성된다. 주행 카메라는 로버 주변의 지형과 장애물 (바위, 웅덩이 등) 영상을 촬영함으로써 원격 조작자가 로버를 안전하게 조작하게 하며, 마스트 캠은 팬/틸트(Pan/Tilt)에 탑재되어 원거리의 지형정보를 효율적으로 구축할 수 있도록 한다. 로버 카메라 배치 시뮬레이션은 이러한 카메라들 간의

기하학적 관계를 모의 환경에서 미리 구현함으로써 카메라 영상의 시야각과 중첩도, 3차원 데이터 취득 결과 등을 미리 확인할 수 있으므로, 무인 로버 카메라 시스템의 상세 설계와 제작에 소요되는 경제적 비용과 시간을 최소화 할 수 있다. 본 연구에서는 먼저 시뮬레이션 기법 적용을 위한 무인 로버의 개념 설계도면을 제작하였고, 로버 카메라의 세부 사양을 결정하였다. 마지막으로 로버 카메라 배치 시뮬레이션을 수행함으로써, 로버에 탑재될 카메라의 위치와 각도를 결정하고 로버 카메라 시스템 제작에 반영하고자 하였다.

## 2. 로버 카메라 배치 시뮬레이션 설계

극한지 탐사 로버의 카메라 시스템은 로버 주변 지형 영상을 촬영함으로써, 로버의 원격 조정을 지원하고 지형 정보 구축에 사용된다. 본 장에서는 향후 제작될 로버의 설계 도면과 카메라 시스템 사양을 결정하였고, 이를 기반으로 한 카메라 배치 시뮬레이션 기법을 설계하였다.

### 2.1 로버 기반 카메라 시스템 설계

무인 로버의 카메라 시스템은 인간의 접근이 어려운 극한 지역에서 로버의 안전한 원격주행과 효율적인 지형 공간정보 구축을 위해 설계되었다 (Fig. 1, Table 1). 먼저 카메라 시스템이 탑재될 로버 본체의 크기는 폭 574mm x 길이 550mm x 높이 287mm이다. 4개 바퀴의 직경은 274mm으로 각 바퀴에는 개별적으로 동작할 수 있는 모터가 탑재되어 있다.

로버의 카메라 시스템은 2대의 마스트 카메라 (Mast Cam)와 6대의 주행 카메라 (Nav Cam)로 구성된다. 마스트 카메라가 장착된 로버의 깃대는 300mm부터 600mm까지 높이 조절이 가능하고, 마스트 카메라의 베이스 라인인 200mm부터 300mm까지 조정할 수 있도록 설계하였다. 또한 60mm 망원 렌즈를 장착한 마스트 카메라는 팬/틸트 (Pan/Tilt) 장치를 이용하여 수평 방향과 수직 방향으로 회전할 수 있으므로, 극한지 험한 지형에서 로버가 이동을 최소화 하면서 원거리의 탐사 영상을 취득할 수 있도록 하였다. 로버의 원활한 원격 조정과 자율 주행을 지원하도록 설계된 주행 카메라는 5.1mm 광각 렌즈를 장착한 전방 및 후방 카메라와 1.7mm 어안 렌즈를 장착한 측면 카메라로 구성된다. 이중 전방 및 후방에 위치한 2대 카메라의 베이스 라인은

Table 1. Technical specification of a rover-based camera system

Camera System	Mast Cam	Nav Cam I	Nav Cam II
Pixel Size	3.69μm(H)×3.69μm(V)	2.75μm(H)×2.75μm(V)	2.0μm(H)×2.0μm(V)
Image Size	1984(H) x 1105(V)	1944(H) x 1092(V)	2592(H) x 1520(V)
Focal Length	60mm	5.1 mm	1.7 mm
Number/Location	Two/Rover mast	Two/Rover front & rear sides	One/Rover left & right sides

200mm부터 300mm까지 조정 가능하도록 하였다.

진행 된다.

### 2.2 로버 카메라 배치 시뮬레이션 기법 설계

로버 카메라 최적 위치 시뮬레이션의 목적은 다수의 카메라들이 어떤 위치와 각도로 장착되어야 원하는 지역의 3차원 지형정보를 정확하고 효율적으로 획득할 수 있는지를 결정하는 것이다. 또한 로버 실제 제작 이전에 정교한 시뮬레이션 실험을 통하여 카메라들의 위치를 선정하여 로버 제작에 소요되는 경제적, 시간적 비용을 최소화하고자 하였다. 로버는 구조와 임무 특성에 따라 카메라 개수와 배치가 다양하다. 따라서 시뮬레이션은 각각의 카메라 세부사양과 로버에서 카메라 위치 (Fig. 1, Table 1) 입력으로 시작되며, 아래 공선 조건식 (1)을 이용하여

$$\begin{aligned}
 x &= x_p - f \frac{m_{11}(X-X_0) + m_{12}(Y-Y_0) + m_{13}(Z-Z_0)}{m_{31}(X-X_0) + m_{32}(Y-Y_0) + m_{33}(Z-Z_0)} + \Delta x \\
 y &= y_p - f \frac{m_{21}(X-X_0) + m_{22}(Y-Y_0) + m_{23}(Z-Z_0)}{m_{31}(X-X_0) + m_{32}(Y-Y_0) + m_{33}(Z-Z_0)} + \Delta y
 \end{aligned} \tag{1}$$

where  $x_p, y_p$ : principal points of image,  $x, y$ : Image measurement,  $\Delta x, \Delta y$ : Image measurement noise,  $X, Y, Z$ : ground coordinates,  $X_0, Y_0, Z_0$ : exterior orientation parameters of camera (camera locations on a rover),  $m_{11} \sim m_{33}$ : components in rotation matrix ( $m_{11}$ :  $\cos\Phi \cos\kappa$ ,  $m_{12}$ :  $-\cos\Phi \sin\kappa$ ,  $m_{13}$ :  $\sin\Phi$ ,  $m_{21}$ :  $\cos\omega \sin\kappa + \sin\omega \sin$

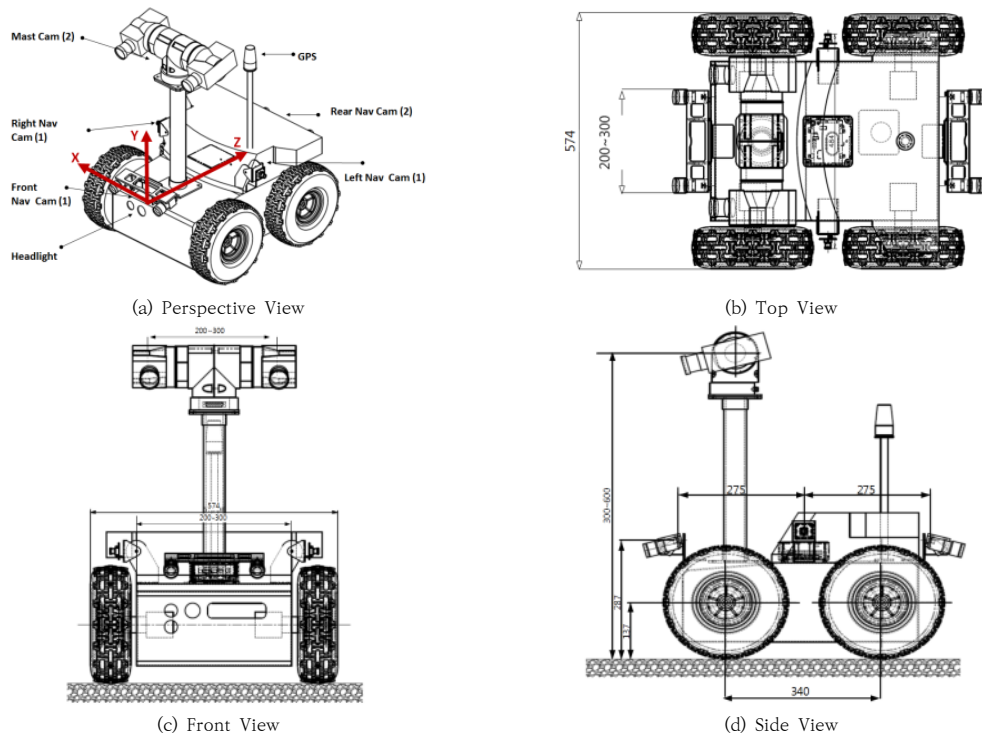


Fig. 1. Concept Design of Rover's Camera System

$\phi \cos \kappa$ ,  $m_{22}: \cos \omega \cos \kappa - \sin \omega \sin \phi \sin \kappa$ ,  $m_{23}: -\sin \omega \cos \phi$ ,  $m_{31}: \sin \omega \sin \kappa - \cos \omega \sin \phi \cos \kappa$ ,  $m_{32}: \sin \phi \cos \kappa + \cos \omega \sin \phi \sin \kappa$ ,  $m_{33}: \cos \omega \cos \omega$ .

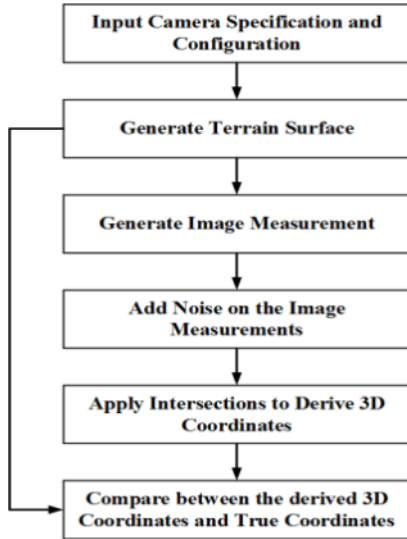
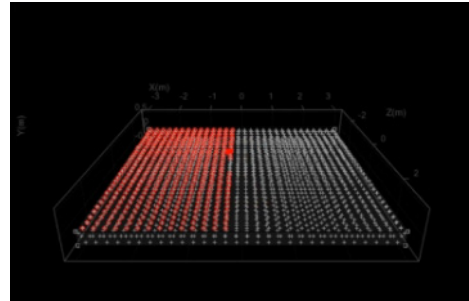


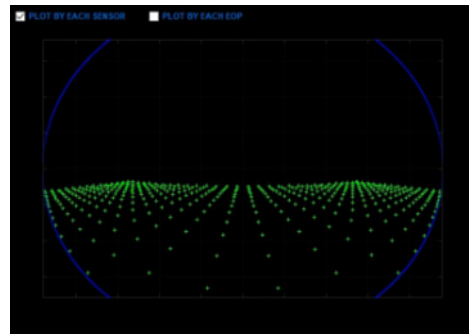
Fig. 2. Overflow of Camera Configuration Simulation

Fig. 2는 카메라 배치 시뮬레이션의 세부 흐름을 보여 준다. 카메라 배치 시뮬레이션의 첫 번째 단계는 로버 카메라의 위치 값과 카메라 사양을 입력하는 단계이다. 본 연구에서 설계한 로버는 총 8대의 총 광학 카메라를 탑재하고 있다. 이들 중 어안 카메라 2대는 각각 로버 플랫폼 좌측 및 우측을 바라보도록 위치가 결정되었기 때문에 본 실험 대상에서 제외되었다. 결국 본 시뮬레이션은 전방 카메라 2대, 후방 카메라 2대 그리고 저조도 카메라 2대를 대상으로 하나, 전방 카메라들과 후방 카메라들은 동일한 상대적 위치를 지니도록 설치되기 때문에, 한 번의 시뮬레이션을 통하여 배치가 결정되었다. 즉 전방 카메라들 및 후방 카메라들 간에는 동일한 배치를 한다는 가정을 기반으로 시뮬레이션이 진행되었다. 두 번째 단계에서는 Fig 1(a)의 로버 카메라 좌표계를 따르는 평면 형태의 가상 지형을 생성하며, 세 번째 단계에서는 공선 조건식 (1)과 (2)를 이용하여 가상 지형을 촬영한 시뮬레이션 영상이 제작된다. Fig. 3 (a)와 (b)는 각각 시뮬레이션을 위해 생성된 가상의 지형과 어안 카메라에 찍힌 가상의 지형영상을 보여준다. 가상의 지형은 하얀색으로 표시되나 어안 카메라의 시야각에 포함된 지형은 빨간색으로 표시하였다. 네 번째 단계에서는 공선 조건식 (1)과 (2)  $\Delta x$ ,  $\Delta y$ 에 1 pixel의 표준 편차를 지니며 정규분포

를 따르는 노이즈를 추가하여 실제 현장에서 취득된 영상의 관측 노이즈를 모사하도록 하였다. 다섯 번째 단계에서 이렇게 제작된 시뮬레이션 카메라 영상들은 공선 조건식의 전방 교회법 (Intersection)을 이용하여 가상 지형의 3차원 좌표 도출에 사용된다. 마지막으로 여섯 번째 단계에서는 도출된 3차원 좌표와 실제 지상 좌표 간의 비교를 수행하게 된다.



(a) Simulated terrain



(b) Simulated terrain image

Fig. 3. Examples of Simulated Terrain and Image from Rover's Fish-eye Camera

### 3. 로버 카메라 배치 시뮬레이션

본 장에서는 로버 카메라의 배치를 결정하기 위한 시뮬레이션을 수행하였다. 먼저 카메라 배치 위치 시뮬레이션 값을 설정하고 다양한 카메라 위치와 각도에서 가상의 지형영상을 취득하였다. 로버 카메라의 최적 배치는 촬영된 가상의 지형영상을 비교 분석하여 결정하였다.

#### 3.1 카메라 배치 시뮬레이션 위치 값 설정

로버 주행 카메라는 로버 주변 근접 영상을 촬영하고 마스트 카메라는 팬/틸트에 탑재되어 원거리에 위치한 관심 지역을 촬영한다. 하지만, 마스트 카메라는 로버 이

동 중에 주행방향(pan angle 0도)으로 고정되어, 주행 카메라의 로버 근접 영상과 함께 근거리 지형 영상을 함께 촬영하도록 하였다. 로버의 주행 및 마스트 카메라는 각각 스테레오 영상을 제공하므로, 로버가 바위, 구덩이 등의 크기와 깊이 등을 인식하고 극복 및 회피 여부를 판단할 수 있게 할 수 있다. 또한 로버 주변의 3차원 지형 모델 구축에 활용될 수 있어 로버 주행 경로의 세부 조정에 이용할 수 있다. 따라서 로버 탑재 카메라의 위치 선정 시뮬레이션은 Table 2와 같은 설정을 통하여 진행되었다. 전방 및 후방 카메라 2대 간의 베이스라인은 200mm부터 300mm까지 10mm 간격으로 변화를 주었으며, 각도는 5도 간격으로 -20도에서 0도까지 변화를 주었다.

마스트 카메라가 탑재된 깃대 길이는 10mm 간격으로 300mm부터 600mm까지 변화를 주었다. 저조도 카메라들 간 베이스라인은 10mm 간격으로 200mm부터 300mm까지 변화를 주었으며, 각도는 5도 간격으로 -20도에서 0도까지 변화를 주었다. Table 2의 카메라 시뮬레이션 설정 값에 따른 시뮬레이션 좌표계 및 카메라의 위치와 자세는 Fig. 1과 Table 3과 같다.

먼저, 시뮬레이션 좌표계는 로버 플랫폼 앞면 상단의 중간 지점을 원점으로 설정하였고, 원점의 우측방향을 X축으로 설정하였으며, 높이 방향을 Y축, 그리고 플랫폼의 후방을 Z축으로 설정하였다 (Fig. 1(a)). 전방 주행 카메라 2대의 중간 지점 좌표는 원점을 기준으로 (0, 15, 0)에 위치한다. 또한 전방 주행 카메라의 베이스 라인은

좌표계의 X축 선에 있으므로, 좌측과 우측의 전방 주행 카메라의 X 좌표 값을 조절함으로써 베이스라인을 변경할 수 있다. Fig. 1 (d)에서 보여 주듯이, 전방 주행 카메라와 후방 주행 카메라들은 동일한 상대 위치를 가진다. 따라서 본 시뮬레이션에서는 효율성을 위해 전방 카메라에 대한 시뮬레이션을 수행한 최적 배치 값을 후방 주행 카메라에 적용하도록 하였다. 마스트 카메라가 탑재된

깃대의 하단은 원점을 기준으로 (0, 0, 110)에 위치하며 최소 300mm에서 최대 600mm까지 높이 조절이 가능하므로, 2대의 마스트 카메라의 Y 좌표 값을 높이 값과 동일하도록 설정하였다. 마지막으로 마스트 카메라와 전방 카메라의 베이스 라인은 X축에 위치하므로, 시뮬레이션에서 두 카메라의 틸트 각도 변경을 위해  $\omega$  값을 조절하였다. 이외에도 Table 4는 시뮬레이션에 사용된 지상 좌표들의 배치 범위를 보여준다. 지상 좌표는 X축 방향으로  $\pm 500$ mm의 범위, Z 축 방향으로 0에서 -2000mm의 범위로 배치되었으며, 높이 방향인 Y축 방향으로는 -270mm 값을 주었다.

### 3.2 카메라 위치 선정 기준

무인 로버 카메라 시스템의 마스트 카메라는 원하는 관심 지역의 고정밀 3차원 지형 데이터를 구축하기 위해 배치되어야 한다. 또한 로버 플랫폼의 전방과 후방에 위치한 주행 카메라는 로버와 가까운 주행 경로 상의 장애물을 3차원으로 구현하여 기동 극복 여부를 판단하고 지

Table 2. Camera Simulation Plan

Camera	Description
Front and Rear Nav Cam	<ul style="list-style-type: none"> <li>Image measurement error (1 standard deviation) = 1 pixel</li> <li>Baseline length changes from 200mm to 300mm with 10mm interval</li> <li>Camera tilting degree changes from -20° to 0° with 5° interval</li> </ul>
Mast Cam	<ul style="list-style-type: none"> <li>Image measurement error (1 standard deviation) = 1 pixel</li> <li>Mast height changes from 300mm to 600mm with 10mm interval</li> <li>Baseline length changes from 200mm to 300mm with 10mm interval</li> <li>Camera tilting degree changes from -20° to 0° with 5° interval</li> </ul>

Table 3. Camera Location Setting Value for Simulation

Camera	X0(mm)	Y0(mm)	Z0(mm)	$\omega$ (deg)	$\phi$ (deg)	$\kappa$ (deg)
Front Nav Cam	Left	-150 ~ -100	15	0	-20 ~ 0	0
	Right	100 ~ 150	15	0	-20 ~ 0	0
Mast Cam	Left	-150 ~ -100	300 ~ 600	110	-20 ~ 0	0
	Right	100 ~ 150	300 ~ 600	110	-20 ~ 0	0

형 경사도를 계산함으로써 효율적인 원격 주행을 지원해야 한다. 또한 주행 카메라의 지형 영상은 탐사 지역의 3차원 지형모델 구축을 위한 보조 자료로서 활용될 수 있다. Table 5는 카메라 위치 선정과정에서 마스트 및 전후방 주행 카메라별로 고려해야할 우선순위를 보여주고 있다. 마스트 카메라와 전방 주행 카메라의 배치에 있어서, 시뮬레이션 결과 중 정확도 10mm 미만의 3차원 지형 데이터를 취득하고, 넓은 영상중첩영역과 긴 베이스 라인을 갖도록 카메라의 위치를 선정하였다. 더불어, 마스트 카메라의 경우 최소 전방 가시영역이 3m 근방의 지형을 포함하도록 하였고, 전방 주행 카메라의 경우 전방 가시영역이 1m 근방을 포함하도록 카메라 위치 선정 기준을 설정 하였다.

### 3.3 카메라 위치 선정 시뮬레이션 결과

카메라의 최적 위치 선정을 위한 시뮬레이션을 통해 무인 로버의 전방 및 후방 주행 카메라와 마스트 카메라 들 간의 상대 위치를 결정하였고 해당 위치를 통해서 기대할 수 있는 3차원 지형정보의 정확도가 계산되었다. 전방 및 후방 주행 카메라 시뮬레이션에서 카메라 베이스 라인 길이는 11번, 틸트 각도를 5번 변경하여 총 55개의 경우 수가 생성되었다. 마스트 카메라의 경우, 카메라 베이스라인 길이는 11번, 높이는 31번, 틸트 각도는 5번 변경하여 총 1705개의 경우 들이 생성되어 비교 분석되었다. Fig. 4와 Table 6은 시뮬레이션을 통해 결정된 카메라들의 최적 위치를 보여준다. 전방 및 후방 주행 카메

라 간의 베이스 라인은 210mm, 틸트 각도는 -10도로 결정되었다. 결정된 두 대의 카메라 위치로부터 수평방향(X방향)으로 20cm, 전방방향(Z방향)으로 87cm의 스테레오 영역이 생성되고,

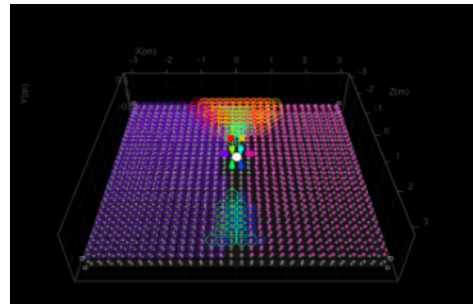


Fig. 4. Simulated Camera Imagery from Rover

3차원 지형 데이터는 수평방향(X방향) 1mm 이하, 수직방향(Y방향) 2mm이하, 전방방향(Z방향) 3mm 이하의 정확도를 가지는 것으로 계산되었다. 마스트 카메라의 경우 베이스 라인은 250mm, 깃대의 높이는 370mm,

틸트 각도는 -10도로 결정되었다. 두 대의 카메라로부터 수평방향으로 30cm, 전방방향으로 145cm의 스테레오 영역이 생성되고, 수평방향 1mm 이하, 수직방향 2mm 이하, 전방방향 10mm 이하의 정확도를 가지는 3차원 지형 데이터가 계산되었다.

Table 4. Simulated Terrain Extent

Min X(mm)	Max X(mm)	Min Y(mm)	Max Y(mm)	Min Z(mm)	Max Z(mm)
-500	500	-270	-270	-2000	0

Table 5. Priority Criteria to Determine Camera Location

Camera	Selection Criteria listed in Order
Front Nav Cam	<ul style="list-style-type: none"> <li>1) Minimum range from the camera is around 1m in the forward direction</li> <li>2) Accuracy of spatial data (1 standard deviation), computed from the images, is less than 10mm</li> <li>3) Width of the stereo-coverage is greater than other pairs of simulated camera images</li> <li>4) Baseline between cameras is longer than other pairs of simulated camera locations</li> <li>5) Length of the stereo-coverage is greater than other pairs of simulated camera images</li> </ul>
Mast Cam	<ul style="list-style-type: none"> <li>1) Minimum range from the camera is around 3m in the forward direction</li> <li>2) Accuracy of spatial data (1 standard deviation), computed from the images, is less than 10mm</li> <li>3) Width of the stereo-coverage is greater than other pairs of simulated camera images</li> <li>4) Baseline between cameras is longer than other pairs of simulated camera locations</li> <li>5) Length of the stereo-coverage is greater than other pairs of simulated camera images</li> </ul>

Table 6. Simulation Result

Camera		Simulation Result
Front Nav Cam	Camera Configuration	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Camera Baseline : 210mm</li> <li>• Camera Tilt Angle: -10 deg.</li> </ul>
	Camera Image	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Stereo region : 20cm (H) X 87cm (V)</li> <li>• Effective Visible Range: 1.13-2.00 m</li> </ul>
	Spatial Data Accuracy	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 1 Standard Deviation (H): less than 1mm (along X-direction)</li> <li>• 1 Standard Deviation (P): less than 2mm (along Y-direction)</li> <li>• 1 Standard Deviation (V): less than 3mm (along Z-direction)</li> </ul>
Mast Cam	Camera Configuration	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Camera Baseline: 250mm</li> <li>• Pole Height: 370mm</li> <li>• Camera Tilt Angle: -10 deg.</li> </ul>
	Camera Image	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Stereo Region : 30cm (H) X 145cm (V)</li> <li>• Effective Visible Range : 2.95-4.40m</li> </ul>
	Spatial Data Accuracy	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 1 Standard Deviation (H): less than 1mm (along X-direction)</li> <li>• 1 Standard Deviation (P): less than 2mm (along Y-direction)</li> <li>• 1 Standard Deviation (V) : less than 10mm (along Z-direction)</li> </ul>

#### 4. 결론 및 향후 연구 계획

인간의 접근이 어려운 극한환경 지역에서 무인 로버는 다양한 센서와 장비를 탑재하고 탐사 임무를 수행한다. 하지만 극한지의 혹독한 기상환경과 거친 지형에서 카메라라는 영상 송수신의 지연, 제한된 시야각 등의 제약이 있으므로, 로버의 탑재 카메라는 안전한 주행과 효율적 탐사를 지원할 수 있도록 배치되어야 한다. 하지만 로버 카메라의 최적 배치를 결정하기 위해서는 다양한 환경에서 반복적인 물리적 실험이 필요하므로 많은 시간과 비용이 소요된다. 이에 본 연구에서는 로버 설계 도면을 기반으로 한 카메라 배치 시뮬레이션을 수행 하였다. 로버의 카메라 시스템은 2대의 마스트 카메라와 6대의 주행 카메라로 구성된다. 마스트 카메라의 시뮬레이션 경우 깃대 높이, 베이스라인 길이, 틸트 각도를 변경하여 총 1705 개의 카메라 배치를 생성하였고, 전방 및 후방 주행 카메라의 경우 베이스 라인 길이와 틸트 각도를 변경하여 55개의 카메라 배치를 생성하였다. 동시에 각각의 시뮬레이션을 통해 가상의 지형을 대상으로 카메라 영상을 생성하여, 전방가시영역, 3차원 지형 데이터의 위치 정확도, 스테레오 영상 중첩영역 등을 비교 및 분석함으로써 마스트 카메라와 전방 및 후방 카메라의 배치를 효율적으로 결정할 수 있었다. 본 연구에서 카메라 배치 시뮬레이션은 가상의 평면 지형을 대상으로 수행되었다. 실제 극한환경지역에서 로버를 운용하기 위해서는 다양한 지형변화에 따른 카메라 배치의 효율성과 카메라의 영상 품질과 송수신 지연 문제의 상관관계 등을 고려해야한다.

따라서 본 연구에서는 향후 극한환경지역을 모사한 모의 지형을 구축하고 로버 성능을 종합적으로 검증하여, 제한한 카메라 시스템의 성능을 개선할 계획이다.

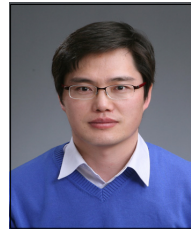
#### References

- [1] Y. Sim, S. Lee, "Development Trend of Remote Operational Robot System for Extreme (Risk) Task," *Industrial Engineering Magazine*, vol. 18, no. 1, pp. 40-42, 2011.
- [2] J. Baek, "Recent Progress in Extreme Environment Robotics Technologies," *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, vol. 36, no. 4, pp. 322-323, 2019.
- [3] E. Sim, "Current Development Trends in Lunar Explorers Around the World," *Current Industrial and Technological Trends in Aerospace*, vol. 14, no. 8, pp. 151-165, 2016.
- [4] L. Ray, A. Adolph, A. Morlock, B. Walker, M. Albert, J. H. Lever, J. Dibb "Autonomous rover for polar science support and remote sensing," 2014 IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium, Beijing China, pp. 4101-4104. 2014.  
DOI: <https://doi.org/10.1109/IGARSS.2014.6947388>
- [5] S. Cho, Y. Kang, T. Lee, "Trajectory Tracking Experiment of Autonomous Mobile Robot for Crevasse Detection on Arctic Environment," *Conference of Korean Society for Precision Engineering*, Jeju, South Korea, pp. 490-491, 2015.
- [6] S. Kawatsuma, M. Fukushima, T. Okada, "Emergency response by robots to Fukushima-Daiichi accident: summary and lessons learned," *Industrial Robot: An*

- International Journal, vol. 39, no. 5, pp.428-435, 2012.  
DOI: <https://doi.org/10.1108/01439911211249715>
- [7] S. Lee, Y. Choi, K. Jeong, "Domestic Recent Works on Robotic System for Safety of Nuclear Power Plants," Journal of the Korean Society for Precision Engineering, vol. 36, no. 4, pp. 323-329, 2019. DOI: <https://doi.org/10.7736/KSPE.2019.36.4.323>
- [8] A. Colaprete, R. C. Elphic, D. Andrews, W. Bluethmann, J. Quinn, D. G. Chavers, "Resource Prospector: Evaluating the ISRU Potential of the Lunar Poles," Annual Meeting of Lunar Exploration Analysis Group (LEAG), Maryland, USA, 2016
- [9] G. Ju, "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, 2016.  
DOI: <https://doi.org/10.5139/JKSAS.2016.44.8.741>
- [10] C. Chen, B. Bu, Y. He, J. Han, "Design, Implementation and Experimental Tests of a New Generation of Antarctic Rover," IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO), Guangzhou, China, pp. 2144-2149, 2012.  
DOI: <https://doi.org/10.1109/ROBIO.2012.6491286>
- [11] E. Kim, W. Lee, C. Hong, "A Study on Local Three-Dimensional Visualization Methodology for Effective Analysis of Construction Environments in Extreme Cold Region," Journal of Korea Spatial Information Society, Vol. 20, No. 6, pp. 129-137, 2012.  
DOI: <https://doi.org/10.12672/ksis.2012.20.6.129>
- [12] S. Hong, H. Shin, "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, 2018.  
DOI: <https://doi.org/10.5762/KAIS.2018.19.7.144>
- [13] K. Hwang, D. Kim, G. Park, S. Kim, S. Park, "Simulation Based Design of Intelligent Surveillance Robot for Mobility," Journal of The Korean Society of Mechanical Engineers, Vol. 32, No. 4, pp. 340-346, 2018.  
DOI: <https://doi.org/10.3795/KSME-A.2008.32.4.340>
- [14] W. Jang, K. Min, J. Son, "A study on Effectiveness of Vision System Varying with Location of Camera," Proc. of the Korean Society for Precision Engineering, Daejun, South Korea, pp. 21~22, 2008
- [15] W. Choi, C. Kim, Y. Kim, "A Study for Efficient Methods of System Calibration between Optical and Range Sensors by Using Simulation," Journal of the Korean Society of Surveying, Geodesy, Photogrammetry and Cartography, Vol. 33, No. 2, pp. 95~101, 2015.  
DOI: <https://doi.org/10.7848/ksgpc.2015.33.2.95>

김 창 재(Changjae Kim)

[정회원]



- 2000년 2월 : 서울대학교 토목공학과 석사
- 2009년 6월 : 캐나다 University of Calgary, Geomatics Engineering 공학박사
- 2014년 9월 ~ 현재 : 명지대학교 토목환경공학과 부교수

<관심분야>

사진측량, 라이다, 센서 인테그레이션, SLAM

박 재 민(Jaemin Park)

[정회원]



- 2004년 2월 : 인하대학교 지리정보공학과 석사
- 2010년 8월 : 인하대학교 지리정보공학과 박사 수료
- 2012년 12월 ~ 현재 : 한국건설기술연구원 수석연구원

<관심분야>

3차원 공간정보, 매핑시스템, 원격탐사

최 강 혁(Ganghyuk Choi)

[정회원]



- 2013년 8월 : 서울대학교 건설환경공학부 석사
- 2018년 8월 : 서울대학교 건설환경공학부 박사
- 2019년 2월 ~ 현재 : 명지대학교 토목환경공학부 연구교수

<관심분야>

센서 시스템 캘리브레이션, 3차원 공간정보



신 휴 성 (Hyu-Soung Shin)

[정회원]



- 1996년 3월 : 한양대학교 자원공학과 암반공학전공 공학석사
- 2002년 1월 : 영국 University of Wales Swansea, 토목공학과 (전 산지반공학전공 공학박사)
- 2003년 6월 ~ 현재 : 한국건설기술연구원 연구위원

<관심분야>

우주건설, 지반공학, 수치모델링, 인공지능, 딥러닝, 영상처리

---

홍 성 철 (Sungchul Hong)

[정회원]



- 2005년 5월 : 위스컨신주립대 토목환경공학과 (지형공간정보공학 석사)
- 2010년 12월 : 위스컨신주립대 토목환경공학과 (지형공간정보공학 박사)
- 2013년 12월 ~ 현재 : 한국건설기술연구원 수석연구원

<관심분야>

달 탐사, 지리정보시스템, 원격탐사