

3D LIDAR 반사율을 이용한 무인지상차량의 주행가능 후보 영역 분석[§]

김 준*** · 안성용* · 민지홍* · 배건성***
* 국방과학연구소, ** 경북대학교 전자공학부

Analysis of Traversable Candidate Region for Unmanned Ground Vehicle Using 3D LIDAR Reflectivity

Jun Kim***, Seongyong Ahn*, Jihong Min* and Keunsung Bae***
* Agency for Defense Development,
** School of Electronics Engineering, Kyungpook Nat'l Univ.

(Received March 20, 2017 ; Revised August 19, 2017 ; Accepted August 23, 2017)

Key Words: Lidar Reflectivity(라이다 반사율), Traversable Candidate Region(주행가능 후보영역)

초록: 무인지상차량의 자율주행을 위한 핵심센서로 사용되는 2D/3D 라이다(LIDAR) 센서에서 제공되는 거리 데이터는 지면 모델링 및 장애물 검출을 위해 효과적으로 활용되지만, 도로의 경계가 모호한 환경 등에서는 주행가능영역에 대한 분석이 어렵게 된다. 본 논문에서는 라이다의 반사율 특성을 이용하여 무인차량의 주행 가능한 영역에 대한 후보 영역을 추가로 분석함으로써 보다 효과적으로 주행가능영역을 검출할 수 있는 기법을 제안하였다. 3D LIDAR의 반사율을 보정하고 무인차량 전방 영역의 반사율에 대한 학습을 통해 주행가능 후보영역을 검출하였으며, 무인차량 실제 운용환경에서의 실험을 통해 후보영역 검출 결과를 검증하였다.

Abstract: The range data acquired by 2D/3D LIDAR, a core sensor for autonomous navigation of an unmanned ground vehicle, is effectively used for ground modeling and obstacle detection. Within the ambiguous boundary of a road environment, however, LIDAR does not provide enough information to analyze the traversable region. This paper presents a new method to analyze a candidate area using the characteristics of LIDAR reflectivity for better detection of a traversable region. We detected a candidate traversable area through the front zone of the vehicle using the learning process of LIDAR reflectivity, after calibration of the reflectivity of each channel. We validated the proposed method of a candidate traversable region detection by performing experiments in the real operating environment of the unmanned ground vehicle.

- 기호설명 -

- i : 다중 빔 기반 LIDAR의 레이저의 인덱스
- r_i : i 번째 레이저의 반사율
- K_i : i 번째 레이저에 의한 관심영역 감지포인트 수
- r_{ik} : i 번째 레이저에서 k 번째 획득한 반사율
- α_i : 반사율 보정률

$p(m_T|r_t)$: 반사율 기반 주행가능 영역모델

1. 서 론




LIDAR 센서는 감지 영역에 대하여 cm급의 정확한 거리 데이터를 제공할 뿐만 아니라 주/야간의 환경제한 없이 데이터를 획득할 수 있기 때문에 지면 높이 모델링, 장애물 검출 및 형상 인식 등 다양한 응용 분야에서 폭넓게 활용된다.^(1,2) 무인지상차량에 적용되는 대표적인 2D/3D LIDAR 센서의 주요 특성을 Table 1에 나타내었다. 특히 Velodyne사의 HDL-32E는 약 1.33° 수직 간격으로

§ 이 논문은 대한기계학회 2016년도 학술대회(2016. 12.14.-16., 강원랜드 컨벤션센터) 발표논문임.

† Corresponding Author, ksbae@ee.knu.ac.kr

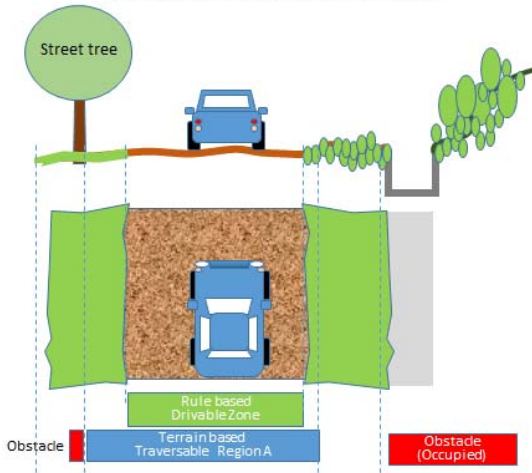
© 2017 The Korean Society of Mechanical Engineers

Table 1 2D/3D LIDAR features^(3,4)

Features			
	LMS511	HDL-64E	HDL-32E
Manufacturer	SICK	Velodyne	Velodyne
Range	65m	120m	100m
Data	Distance	Distance / Intensity	Distance / Calibrated reflectivities
Channels	1	64	32
FOV(V, H)	- / 190°	26.8°/360°	41.3°/360°
Scan rate	25~100Hz	5~20Hz	5~20Hz



(a) Various road environments



(b) Traversable region definition

Fig. 1 Various road environments and traversable region analysis

32개의 레이저원이 배치된 센서 헤더가 360도를 회전하면서 초당 약 700,000 포인트의 거리 데이터와 반사율 정보를 함께 제공하는 대표적인 3D LIDAR 센서이다.⁽³⁾ HDL-32E 센서는 포장도로 혹은 야지 환경에서의 무인자동차 자율주행을 위한 지면의 굴곡 및 경사도 등을 활용한 주행가능 여부 분석 등에서 핵심 센서 역할을 담당한다. 하지만 Fig. 1에서와 같이 연석이 없고 도로의 경계가 모호한 주행로에서는 단순히 거리 값을 기반으로 한 지면 높이차 등과 같은 기하학적인 특

징만을 이용해서는 장애물을 검출하거나, 주행가능 영역을 검출함에 있어 많은 어려움을 겪게 된다. 이에 따라 일부 영상 기반의 지면 분류 등과 같은 기법으로 주행영역을 찾는 방법도 같이 활용되고 있으나, 외부 광원에 의존하는 카메라 센서 특성으로 인해 해당 기법의 활용이 제한되는 문제점이 있다.

이러한 문제점을 보완하기 위해 거리 데이터와 함께 획득되는 지면 혹은 물체에 대한 반사율 정보를 차선 인식, 위치 보정 및 장애물 탐지기법 등에 적용하고 있다.⁽⁵⁻⁹⁾ 하지만 대부분의 연구가 차선 및 표지판 등 주요 물체에 대한 반사율 정보를 중점적으로 다루고 있으며, 반사율을 주행영역 분석에 적용한 연구는 미미한 상황이다.

본 연구에서는 물체 혹은 지면의 재질 및 색상 등의 특성이 반영된 LIDAR 센서의 반사율 특성을 이용하여 무인자동차가 현재의 위치에서 주행할 수 있을 영역, 즉, 주행가능 후보 영역의 검출 성능을 향상시킬 수 있는 방법을 제안하였다. 이를 위해 LIDAR 센서의 지면에 대한 반사율 특성을 분석하고 채널별 특성을 보정하였으며, 주행하고 있는 영역과 유사한 반사율 특성을 가지는 영역을 분석함으로써 주행가능 후보 영역을 검출하였다. 또한 실제 환경에서 획득한 데이터를 실시간으로 분석하고 주행가능 후보 영역을 검출함으로써 제안한 기법의 타당성을 검증하였다.

2. LIDAR의 반사율 보정

LIDAR 센서의 반사율 정보는 주/야간의 환경 제한 없이 지면 및 물체 반사면의 거칠기, 재질 및 색상 등이 반영된 특징요소로서 활용할 수 있는 장점이 있지만 센서를 구성하는 소자의 특성에 따라 나타날 수 있는 반사율 분포 특성에 대한 보정이 요구된다.⁽²⁾ 일반적으로 제작사는 센서가 제공하는 거리 값 및 반사율에 대해 자체적인 보정 과정을 거쳐 제품을 출시하지만, 센서를 운용하는 실제 환경과는 동일할 수 없기에 획득하는 데이터는 원하지 않는 에러를 포함하게 된다.

Fig. 2는 차량 전방투프에 장착된 HDL-32E 센서를 통해 동일한 재질의 포장도로 특정 영역에 대한 레이저 레이어별 반사율 특성의 분포 및 평균을 나타낸 것이다. 동일한 재질의 영역을 감지했음에도 불구하고 레이저 채널별로 서로 다른 반사율 분포 특성을 가지는 것을 볼 수 있다. 유

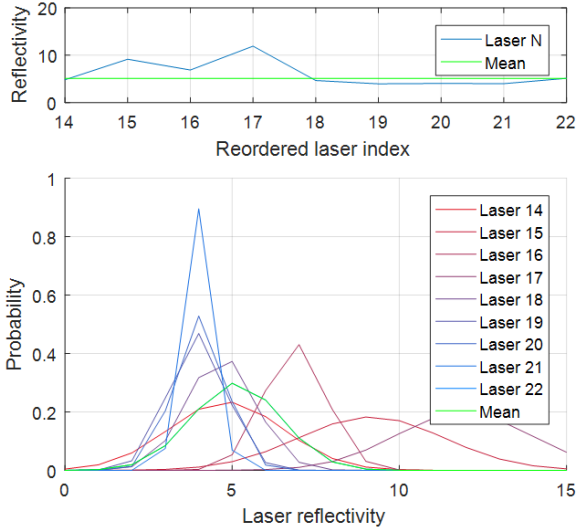


Fig. 2 Reflectivity distribution of each laser

사한 재질의 지면을 분류하여 주행 가능한 맵으로 표현하고자 함에 있어 이러한 채널별 차이는 맵을 생성함에 있어 에러를 발생시키게 된다. 이러한 문제로 인해 LIDAR 센서의 반사율을 활용함에 앞서 반사율 정보의 보정이 요구된다.

Jesse Levinson은 HDL-64E와 같은 다중 빔 기반의 LIDAR 센서의 반사율 보정을 위해 64×256 의 Laser-Intensity 맵핑 테이블을 생성하고 이를 통해 신호를 보정하였다.⁽¹⁰⁾ 이 방법은 반사율 혹은 Intensity의 수치에 영향을 끼치는 다양한 환경에 대한 요소를 레이저 채널 및 Intensity 간 맵핑 테이블로 간소화하여 다양하게 활용할 수 있는 장점이 있지만 맵핑 테이블 분석을 위해 개별 레이저에 대한 충분한 반사율 데이터가 다양한 환경에서 획득되어야 한다. 더욱이 정확한 분석을 위해서는 데이터 간 정합을 통한 위치 보정이 적용되어야 하기 때문에 활용가능한 수준의 보정 테이블을 획득하기가 상당히 어렵다.

본 논문에서는 3D LIDAR의 반사율 데이터를 활용하여 무인지상주행 환경에서 유사한 영역을 분석하는 목적에 부합하는 간단한 보정기법을 적용하였다. 원활한 분석을 위해 보정하고자 하는 3D LIDAR 센서는 통상적인 무인지상차량의 센서 배치를 기준으로 무인지상차량의 상부에 고정되어 있으며 센서의 개별 채널은 평지 기준 특정 거리를 지향한다고 가정한다. 이것은 센서를 고정하고 개별 채널이 특정거리를 지향하게 함으로써 반사율에 영향을 주는 개별 레이저 빔의 입사각에 대한 영향을 개별 채널의 특성으로 단순화하

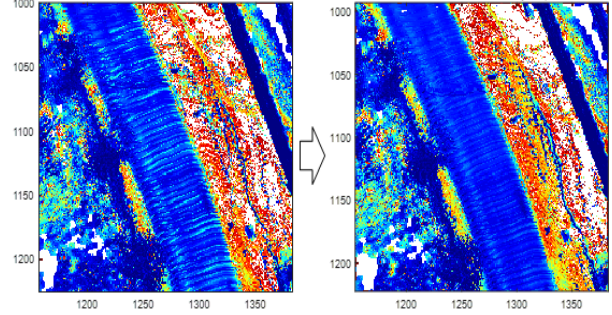


Fig. 3 Reflectivity map before and after calibration

기 위함이다. 따라서 센서의 반사율은 크게 개별 채널의 특성 및 지면 혹은 물체의 속성에 영향을 받는 것으로 간소화 할 수 있다. 본 연구에서는 센서 개별 채널의 특성 차이와 측정거리에 대한 영향성을 실험적인 분석을 통해 하나의 파라미터로 모델링하였다.

개별 채널에 대한 반사율 보정용 파라미터 산출을 위해 동일한 재질의 도로 환경을 실시간으로 주행하면서 획득한 차량 전방의 특정 영역의 개별 채널의 반사율 데이터가 동일한 패턴을 가질 수 있도록 채널별로 반사율을 보정하였다. 즉, 반사율(r_i)에 대한 보정식을 식 (1)과 (2)와 같이 반사율 보정율(α_i)을 활용하여 간단하게 정의하였다.

$$r'_i = f(r_i) = \alpha_i \cdot r_i \quad (1)$$

$$\alpha_i = \left(\sum_{k=1}^{32} \sum_{l=1}^{K_i} r_{ik} \right) / \sum_{k=1}^{K_i} r_{ik} \quad (2)$$

여기서 K_i 는 i 번째 개별 레이저 채널이 관심 영역을 감지한 포인트 수, r_{ik} 는 k 번째 획득한 반사율을 의미하며, 반사율의 보정율 α_i 는 식 (2)에서와 같이 관심영역의 반사율 평균에 대한 해당 레이저 빔의 반사율 평균의 비로 구한다.

무인지상차량의 상부에 고정된 HDL-32E 센서가 차량 구조물 등의 간섭 없이 지면을 감지할 수 있는 레이저 채널에 한하여 사전 획득한 데이터를 기준으로 보정 파라미터를 산출하였다. Fig. 3은 HDL-32E 센서를 통해 획득한 반사율을 기반으로 생성한 반사율 맵으로서 반사율의 보정 전과 후를 비교한 것이다. Fig. 3의 좌측은 반사율 보정전의 경우로서 도로 부분의 동일 매질의 지면에 대한 반사율이 고르지 않음을 볼 수 있는데, 우측 그림의 반사율 보정 후에는 동일 매질

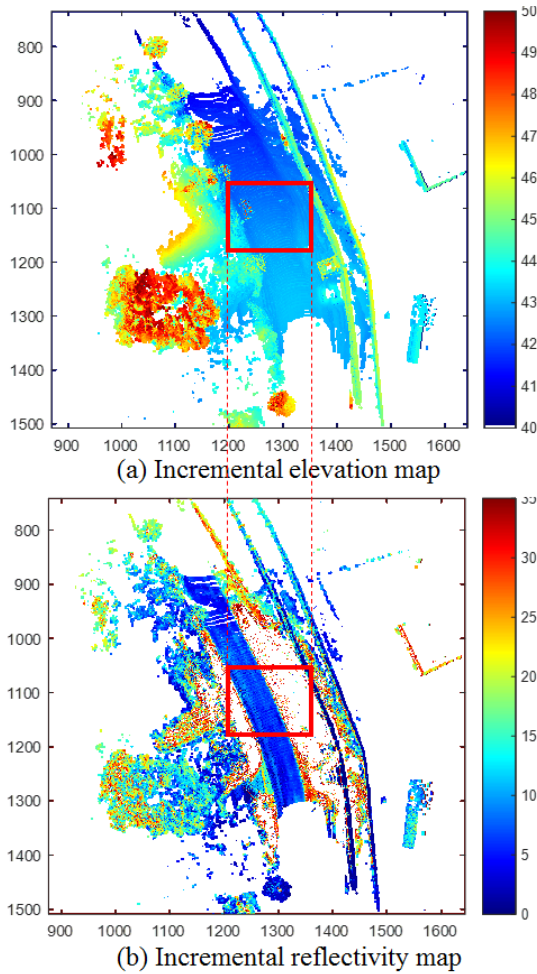


Fig. 4 Elevation and Reflectivity map

의 지면에 대한 반사율이 상당히 고르게 보임을 확인할 수 있다.

3. 주행가능 후보영역 분석

Fig. 4는 무인차량이 포장도로를 주행하면서 획득한 데이터를 기반으로 지면 높이를 모델링한 것과 반사율을 공간상으로 누적한 것이다. Fig. 4(a)의 붉은색 사각 영역에서와 같이 셀 간 높이 차 혹은 경사도 등의 기하학적인 특징으로는 도로의 경계 구분이 모호하게 보이지만 Fig. 4(b)와 같이 LIDAR의 반사율은 도로 재질의 차이로 인한 도로 경계를 잘 보여주고 있음을 알 수 있다. 본 논문에서는 이를 활용하여 주행가능 후보 영역을 검출하였는데, 세부적인 과정은 Fig. 5와 같다. 앞서 제시한 바와 같이 반사율에 대한 보정은 개별 레이저 채널에 대한 보상계수를 기 확보된 데이터를 기반으로 사전 분석하고, 실시간으

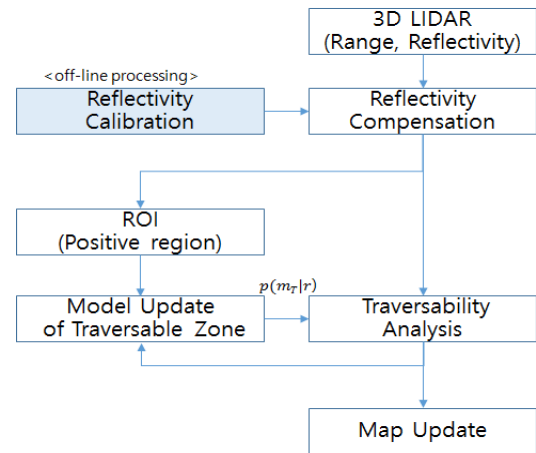


Fig. 5 Block diagram of the proposed method

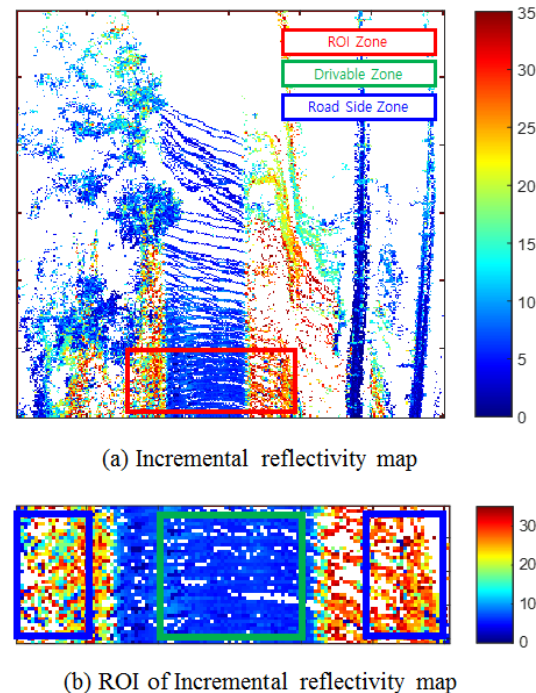


Fig. 6 Analysis of the reflectivity distribution of the traversable area

로 입력되는 센서 데이터에 이를 반영한다. 또한 주행 가능한 영역의 분석을 위해 관심영역(ROI: region of interest)에 대한 반사율의 분포특성을 실시간으로 분석하며, 이를 기반으로 주행 가능 영역에 대한 모델을 생성하고 지속적으로 갱신한다. 센서로부터 입력된 반사율 데이터 및 생성한 주행가능 영역에 대한 모델을 기반으로 최종적으로 주행가능 후보 영역에 대한 지도를 생성한다.

먼저 순차적으로 획득되는 센서 데이터로 Fig. 6(a)와 같은 격자구조 기반의 반사율 지도(m_t)를

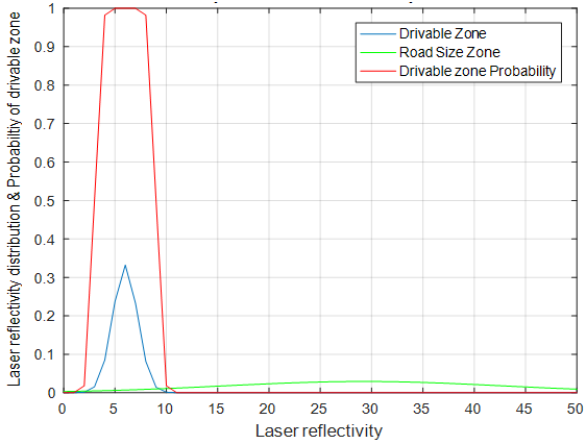


Fig. 7 Laser reflectivity distribution and probability of the traversable area

만들고, 무인지상차량의 진행 방향 영역에서 일부를 관심영역(붉은색 사각영역: $4m \times 12m$)으로 선정한다. 주행가능 영역의 모델을 생성하기 위해 우선적으로 선정된 관심영역 중 차량이 주행한 일부 영역(녹색 사각영역(m_T): $4m \times 4m$)과 그 외 영역(파란색 사각영역(m_N): $4m \times 2m$ 2개)에 해당하는 반사율 분포특성을 가우시안 분포로 각각 모델링 한다. 무인차량이 주행한 영역을 주행가능영역(m_T)으로 가정할 경우, 두 영역에 대한 반사율 분포 특성($p(m_T)$, $p(m_N)$)에 대한 우도비율 검정기법(LRT: likelihood ratio test)을 활용하여 주행가능영역으로 매칭 되는 반사율에 대한 범위를 분석하고, 반사율의 경계(γ_1 , γ_2)를 기준으로 식 (3)과 같은 반사율의 영역에 대한 주행가능 확률, $p(m_T|r_t)$ 를 모델링하였다. 이는 t 시점에 획득한 센서의 반사율 r_t 에 대한 해당영역(m)이 주행가능(m_T)일 확률 값을 의미한다.

$$p(m_T|r_t) = \begin{cases} \frac{1}{1 + e^{-\lambda(r_t - \gamma_1)}} & : r_t < (\gamma_1 + \gamma_2)/2 \\ \frac{1}{1 + e^{\lambda(r_t - \gamma_2)}} & : r_t > (\gamma_1 + \gamma_2)/2 \end{cases} \quad (3)$$

단, 주어진 임계치는 $\gamma_1 < \gamma_2$ 관계로 가정한다. 식 (3)에서 λ 는 $p(m|z)$ 의 감쇠 인자로 실험적인 데이터 분석을 통해 최적의 값으로 설정하였다. 일부 주행가능 확률모델에 대한 수식적인 정리는 저자의 유사 연구 결과로 대체한다.⁽²⁾

무인지상차량이 주행할 경우, 도로의 상황 및 주변 환경이 변함에 따라 반사율의 분포 특성 또한 변하게 된다. 이를 반영하기 위해 관심영역의



Fig. 8 Experimental unmanned vehicle

반사율 분포 특성을 주기적으로 분석하여 반사율에 대한 주행가능영역 모델을 갱신해 준다.

HDL-32E 센서로부터 획득한 반사율 데이터는 레이저 채널별로 얻어진 반사율 보정 파라미터를 통해 보정한 후 주행가능영역에 대한 반사율의 확률모델 $p(m_T|r_t)$ 을 통해 주행가능 확률지도 m' 을 생성한다. 생성한 확률지도는 식 (4)과 같이 0.5 이상의 수치를 가질 경우 기 주행한 영역과 유사한 반사율 분포특성을 가지는 영역으로 판정한다. 이는 앞서 정의한 모델 함수가 도로의 경계에서의 반사율 수치, 즉 주행가능영역과 그 이외 지역을 구분 짓는 반사율 수치에서 실험적으로(?) 0.5의 확률 값을 가지도록 설정하였기 때문이다. 또한 순차적으로 획득 및 분석된 LIDAR 반사율 기반의 주행가능 확률지도의 신뢰도를 높이고 확장된 영역의 주행가능 후보영역 분석을 위해 베이지 공식을 활용하여 맵을 갱신하도록 하였다.⁽¹¹⁾

$$p(m^t) > 0.5 : \text{traversable candidate region} \quad (4)$$

4. 실험 및 검토

본 논문에서 제안한 주행가능 후보영역 분석 기법에 대한 검증을 위하여 도로의 경계가 모호한 포장도로의 다양한 상황에서 획득한 HDL-32E 3D LIDAR 센서 데이터를 사용하여 실험하였다.

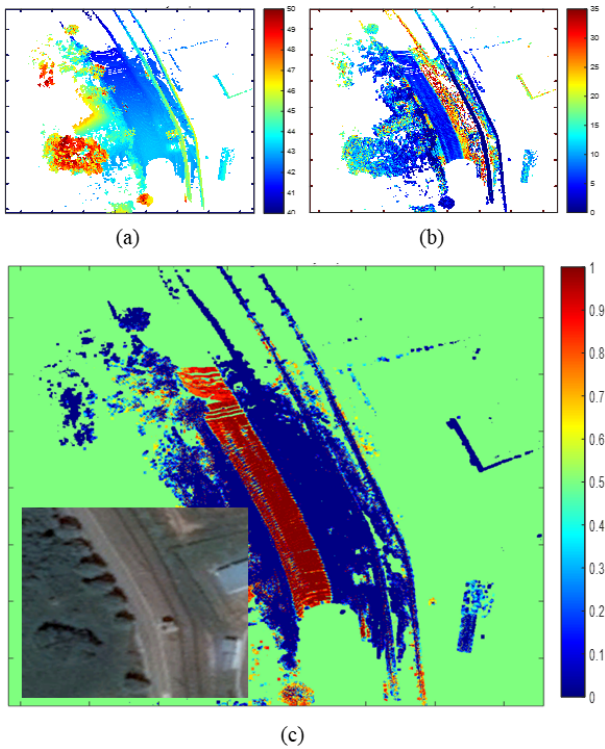


Fig. 9 Traversable candidate region #1, (a) Elevation map, (b) Incremental reflectivity map, (c) Incremental traversable candidate probability map

실험에 사용된 HDL-32E 3D LIDAR 센서는 초당 약 70만 포인트의 거리 데이터 획득이 가능하며, 전방향의 데이터를 약 5~20Hz 속도로 데이터를 갱신한다. Fig. 8과 같이 감시정찰용 무인차량 전방 상부에 HDL-32E 3D LIDAR 센서를 장착하여 10Hz 속도로 주변 환경의 거리 및 반사율 데이터를 획득하였다. 더불어 무인차량에 장착된 항법 센서(GPS/IMU)로부터 획득되는 위치 및 자세 데이터를 100 Hz로 수신 받아 좌표변환 및 시공간상의 데이터 융합 및 갱신에 활용하였다. 센서로부터 수신한 10 Hz의 포인트 데이터의 반사율 데이터는 주행가능 후보 영역에 대한 확률 값으로 표현되고 항법 데이터를 활용하여 순차적으로 누적 및 갱신함으로써 최종적인 주행가능 후보 영역을 Fig. 9와 10과 같이 생성하였다.

Fig. 9(a)는 3D LIDAR의 거리 데이터를 기반으로 한 지면높이 지도를 나타내며, 9(b)는 동일시점에 획득한 반사율 지도를 보인 것이다. Fig. 9(c)는 최종적으로 분석한 반사율 특성 기반의 주행가능 후보영역을 확률 값으로 표현한 것과 운용지역에 대한 항공영상을 같이 표현한 것이다.

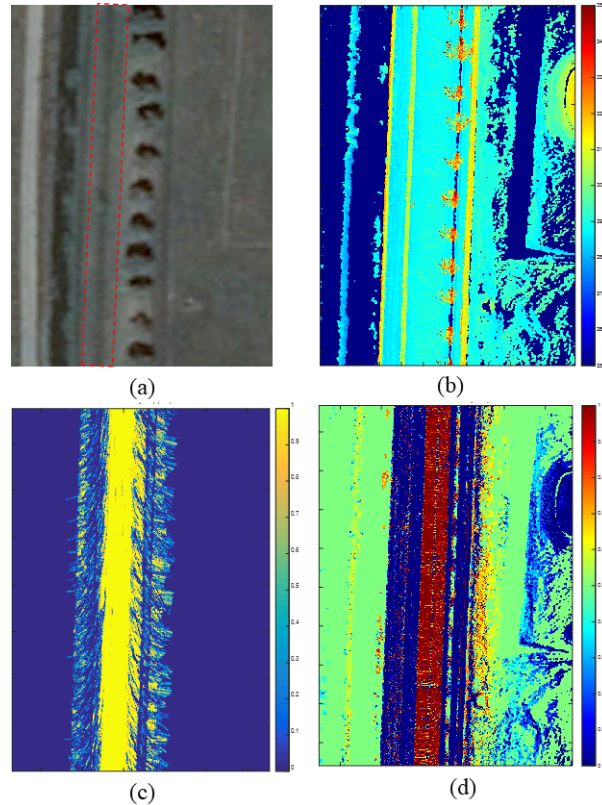


Fig. 10 Traversable Candidate Region #2, (a) Satellite image, (b) Incremental elevation map, (c) Incremental traversable map based on slope feature, (d) Incremental traversable candidate probability map with reflectivity

Fig. 9(c)에서 붉은색으로 표현된 영역은 기 식별된 관심영역에 대한 주행가능 모델과의 유사도가 높아 주행가능 영역으로 분석된 영역이며, 파란색 영역은 그 외 영역으로서 관심영역과는 지면의 특성이 다른 영역으로 분석된다. 다만, 일부 도로 안쪽 부분에서 상태가 다르게 분석되는 영역은 도로에 모래, 흙 및 잡초 등의 이물질이 흩어져 있는 상황으로 지면의 반사율 측면에서는 주행가능 이외의 영역으로 식별되었다.

Fig. 10의 경우는 아스팔트로 포장된 편도 1차의 직선도로로 Fig. 10(a)와 같이 도로변에 짧게 잘려진 풀과 키가 큰 조경수가 있는 영역에서의 주행가능 후보영역을 분석한 결과이다. Fig. 10(b)는 3D LIDAR의 거리 데이터를 기반으로 구성된 지면높이 지도로서 중앙 도로와 평행하게 장벽과 같은 장애물(노란색 영역)과 도로 변의 나무들을 구분할 수 있다. 하지만, 높이 정보만으로는 실제적인 도로의 경계가 어디까지 인지 뚜렷하게 구분 지을 수 없음을 볼 수 있다. Fig. 10(c)와 같이

지면의 경사도를 기반으로 한 주행가능영역을 표현한 것에서는 10(b)보다는 주행 가능한 도로영역을 잘 찾아주지만 여전히 명확한 경계를 찾아 주지는 못한다.⁽²⁾ 하지만, Fig. 10(d)와 같이 반사율을 기반으로 한 주행가능 후보영역을 검출한 결과는 거의 일정한 폭을 가지는 도로의 형상으로 영역을 찾아 주고 있음을 알 수 있다. 또한 상대적으로 아스팔트 도로 보다는 반사율이 높은 도로 위의 차선 정보도 동일하게 구분되는 것을 확인할 수 있다.

5. 결론

본 논문에서는 무인지상차량의 자율주행을 위한 환경인식의 일환으로 3D LIDAR 센서의 반사율 특성을 활용한 주행가능 후보영역 분석 기법을 제안하였다. 3D LIDAR의 반사율을 활용함에 앞서 관심영역에 대한 반사율 분포 특성을 분석하여 이를 기반으로 개별 레이저 채널서 획득되는 반사율을 보정하였다. 더불어 무인차량이 주행하는 영역의 정보를 활용하여 LIDAR 센서의 반사율에 대한 주행가능 영역 모델을 생성하고, 실시간으로 획득되는 센서의 반사율을 기반으로 주행가능 후보영역을 분석하였다. 제안한 기법의 검증에 위해 실제 환경에서 도로의 경계가 모호한 영역의 센서 데이터를 기반으로 분석한 결과를 제시하였으며, 다양한 환경에서 주행가능영역을 검출할 수 있음을 확인하였다. 본 연구를 통해 분석한 반사율 기반의 주행가능 후보영역은 향후 3D LIDAR 센서의 거리정보를 기반으로 한 지면의 기하학적인 특징 및 포인트의 분포특성 등과 함께 무인차량의 자율주행을 위한 주행가능영역을 강인하게 검출하기 위한 요소로 활용할 예정이다.

참고문헌

(References)

(1) Choi, T. S., Shim, S. D. and Min, J. H., 2016, "A Study of 3D LIDAR based-Obstacle and Ground Detection Algorithm for Unmanned

Ground Vehicles driving on Rough Terrain," Conference of the Korean Society of Mechanical Engineers, pp. 2824~2829.

(2) Kim, J., Min, J. H., Kwak, K. H. and Bae K. S., 2017, "Traversable Region Detection based on a Lateral Slope Feature for Autonomous Driving of UGVs," *Journal of Institute of Control, Robotics and System*, Vol 23. No 2, pp. 67~75.

(3) Operating Instructions, Laser Measurement System of the LMS500 Product Family (www. sick.com).

(4) LiDAR Comparison chart_Rev-A_2_Web, (www. velodynelidar.com).

(5) Hata, A. and Wolf, D., 2014, "Road Marking Detection using LIDAR Reflective Intensity Data and its Application to Vehicle Localization," IEEE International Conference on Intelligent Transportation System(ITSC), pp. 584~589.

(6) Ahn, S. Y., Min, J. H. and Kim, J., 2016, "A Lane Detection Method for Unmanned Ground Vehicle Using Reflectivity of 3D LIDAR," Conference of the Korean Society of Mechanical Engineers, pp. 2811~2815.

(7) Min, J. H., Choe, J. H. and Kwak, K. H., 2016, "A Study of 3D LIDAR based-Localization Algorithm for Unmanned Ground Vehicle," Conference of the Korean Society of Mechanical Engineers, pp. 2816~2819.

(8) Sugerm, B., Steder, B. and Burgard, W., 2016, "Terrain-adaptive Obstacle Detection," 2016 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems(IROS), Daejeon, pp. 3608~3613.

(9) Jung, T. K., Song, J. H., Im, J. H., Lee, B. H. and Jee, G. I., 2016, "Localization using 3D-Lidar Based Road Reflectivity Map and IPM Image," *Journal of Institute of Control Robotics and Systems(ICROS)*, Vol. 22, No 12, pp. 1061~1067.

(10) Levinson, J. and Thrun, S., 2010, "Robust Vehicle Localization in Urban Environment Using Probability Maps," IEEE International Conference on Robotics and Automation(ICRA), pp. 4372~4378.

(11) Sock, J. I., Kim, J., Min, J. H. and Kwak, K. H., 2016, "Probability Traversability Map Generation using 3D-LIDAR and Camera," IEEE International Conference on Robotics and Automation(ICRA), pp. 5631~5637.