

2차원 라이다 기반 3차원 포트홀 검출 시스템

김정주¹ · 강병호² · 최수일^{2*}¹(주)만도 DAS센터²전남대학교 전자컴퓨터공학부

2D LiDAR based 3D Pothole Detection System

Jeong-joo Kim¹ · Byung-ho Kang² · Su-il Choi^{2*}¹Driver Assistance System Center, Mando Corporation, Seongnam-si 13486, Korea²*School of Electronics and Computer Engineering, Chonnam National University, Gwangju 61186, Korea

[요 약]

본 논문은 2D 라이다를 이용해서 포트홀을 검출하는 시스템과 알고리즘을 제안한다. 기존의 포트홀을 검출하는 방법에는 진동, 3D 복원, 영상, 명암을 기반으로 한 방법이 있다. 제안하는 포트홀 검출 시스템은 저가형 LiDAR 두 개를 이용하여 포트홀 검출 성능을 개선한다. 포트홀 검출 알고리즘은 LiDAR를 통해 얻은 데이터의 노이즈를 제거하기 위한 전처리과정, 시각화를 위한 클러스터링과 선분추출, 포트홀 검출을 위한 기울기 함수를 구하는 단계로 나뉜다. 기울기 함수를 통해 추출된 데이터의 특징점을 찾아내어 포트홀 여부를 검사하고 포트홀의 깊이와 폭을 측정한다. 2개의 라이다를 활용한 포트홀 검출 시스템을 개발하고, 라이다 장치를 이동하면서 포트홀을 검출함으로써 2D LiDAR를 이용한 3차원 포트홀 검출 시스템의 성능을 보인다.

[Abstract]

In this paper, we propose a pothole detection system using 2D LiDAR and a pothole detection algorithm. Conventional pothole detection methods can be divided into vibration-based method, 3D reconstruction method, and vision-based method. Proposed pothole detection system uses two inexpensive 2D LiDARs and improves pothole detection performance. Pothole detection algorithm is divided into preprocessing for noise reduction, clustering and line extraction for visualization, and gradient function for pothole decision. By using gradient of distance data function, we check the existence of a pothole and measure the depth and width of the pothole. The pothole detection system is developed using two LiDARs, and the 3D pothole detection performance is shown by detecting a pothole with moving LiDAR system.

색인어 : 포트홀, 라이다, 클러스터링, 선분추출, IEPF 알고리즘

Key word : Pothole, LiDAR, Clustering, Line extraction, Iterative End-Point Fit Algorithm

<http://dx.doi.org/10.9728/dcs.2017.18.5.989>



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 16 August 2017; Revised 27 August 2017

Accepted 31 August 2017

*Corresponding Author; Su-il Choi

Tel: +82-62-530-1792

E-mail: sichoi@jnu.ac.kr

1. 서론

최근 여름철 집중호우와 겨울철 폭설 등 이상기후로 포트홀(Pot Hole)의 발생이 급증하여 교통안전과 도로손상에 큰 영향을 미치고 있다. 이뿐만 아니라 차량파손 및 사고유발 등 사회적 문제를 유발시켜 사회적 비용 발생의 원인이 되고 있다. 이에 포트홀을 효율적으로 관리하기 위해 포트홀 자동탐지 기법들이 연구되고 있다.

포트홀은 도로가 파손되어 냄비처럼 생긴 구멍이 파인곳을 말하며, 최소 길이는 15 cm에 해당한다[1]. 포트홀을 검출하는 방법에는 진동, 3D 복원, 영상을 기반으로 한 방법이 있다[2]. 진동을 이용하는 방법은 자동차가 포트홀을 지날 때 감지되는 진동으로 포트홀을 판단한다[3]. 하지만 도로의 연결 부분, 센서를 직접 접촉하는 경우 때문에 신뢰할 수 있는 접근법이 아니다. 3D 복원은 고사양 고비용의 LiDAR (Light Detection and Ranging) 혹은 레이저 스캐너를 이용하기 때문에 가격 측면에서 비효율적인 방법이다[4]. 영상을 이용한 방법은 영상을 획득하고 분석함으로써 포트홀을 검출하는데, 이 방법은 그림자, 노면패치 등 유사한 형태의 노이즈들로 인해 영상을 이용한 포트홀 인식에 어려움이 많다[5]-[7]. 기존의 명암기반의 포트홀의 재질 특성을 이용한 많은 연구는 높은 탐지율 성과를 이루었지만 여전히 다양한 노이즈 문제에 직면하고 있다.

2D 라이더는 주로 이동 로봇의 실내 지도 구축에 활용되고 있다[8]. 본 논문에서는 비용, 효율성, 데이터의 정확성을 기대할 수 있는 2D 라이더를 이용해서 포트홀을 검출하는 알고리즘과 시스템을 개발한다. 본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 2D 라이더기반 포트홀 검출 알고리즘을 제안한다. 3장에서는 2D 라이더 2개를 활용한 포트홀 검출 시스템을 개발하고 포트홀 검출 성능을 보인다. 더불어, 이동 중 포트홀을 검출하여 3차원 포트홀 정보를 추출하는 성능을 실험한다. 마지막으로 4장에서 결론을 맺는다.

II. 라이더기반 포트홀 검출 알고리즘

우선 그림 1의 포트홀 검출 모델을 고려한다. 사각형 형태의 포트홀을 지면으로부터 1 m 높이에 위치한 2D 라이더를 활용하여 수직으로 스캔한다. 제안하는 포트홀 검출 알고리즘은 다음의 4단계로 이루어진다. 첫 번째는 2D 라이더를 통해 얻은 데이터에서 노이즈를 제거하는 필터링 단계, 두 번째는 라이더 센서의 포인트 클라우드 데이터로부터 클러스터링을 통해 선분을 추출하는 단계, 세 번째는 선분함수의 1차 미분을 통한 기울기 함수를 구하는 단계, 네 번째는 기울기 함수의 특징점을 찾아서 포트홀 여부를 판단하고 포트홀의 폭과 깊이 정보를 추출하는 단계이다.

2-1 필터링

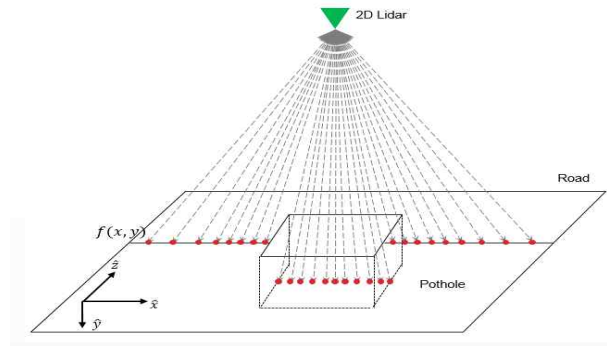


그림 1. 포트홀 검출 모델
Fig. 1 Pothole detection model

2차원 라이더를 이용하여 지면을 스캔하였을 경우 그림 1 형태의 포인트 클라우드 데이터를 얻을 수 있으며 극좌표 형태로 표현하면 다음과 같다.

$$R = \{(r_n + \epsilon_n, \phi_n) | n = 1, \dots, N\} \quad (1)$$

여기에서 r_n 은 n 번째 거리값, ϵ_n 은 n 번째 측정오차 값, ϕ_n 은 n 번째 각도이며 거리값 측정은 $\phi_{\min} \leq \phi \leq \phi_{\max}$ 에 대해서 이루어진다. 라이더를 통해 측정된 거리 포인트 집합 R 은 노이즈를 포함하고 있다. 라이더는 레이저 펄스를 쏘고 반사되어 돌아오는 시간을 측정하기 때문에 반사되지 않으면 소용이 없다. 즉 도로위에 투명한 유리, 페트병 등 반사되지 않고 투과하거나 여러 방향으로 흩어지는 물체가 있을 경우 데이터에 노이즈가 포함되어 있을 수 있고, 저렴한 라이더의 경우 상대적으로 많은 노이즈가 포함되어 있다. 그러므로 데이터 클러스터링과 선분추출 작업을 진행하기 전에 측정 데이터의 노이즈를 제거하는 작업을 수행해야 한다.

그림 2는 라이더 데이터에 대한 중간값 필터의 결과를 보인다. 노이즈를 제거하기 위해서 2D 라이더를 통해 같은 구간에

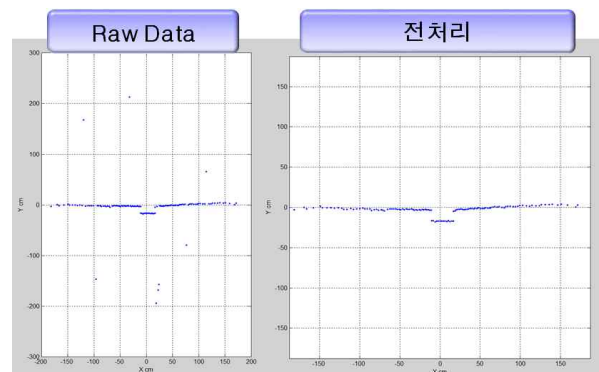


그림 2. 라이더 데이터에 대한 중간값 필터
Fig. 2 Median filtering about LiDAR data

대해 여러 번 스캔을 진행하여 충분히 비교 가능한 데이터 집합을 구한다. 다음으로 중간값 필터 (median filter)를 사용하여 노이즈를 제거한다. 영상처리에서 사용되는 중간값 필터는 이미지 내에서 영역을 설정하고 그 영역 내의 픽셀 값들을 모두 같게 만드는 과정이다. 중간값 필터의 장점은 잡음의 크기가 특정 화소에서 강하게 나타날 경우 효과적으로 제거가 가능하다는 점이다. 마찬가지로 2D 라이다 데이터는 유효 데이터와 노이즈의 차이가 평균히 크기 때문에 메디안 필터가 노이즈 제거에 효과적이다.

2-2 선분 추출

노이즈를 제거한 후 포인트 데이터를 직각좌표의 형태로 표현하면 다음과 같다.

$$C = \{p_n | n = 1, \dots, N\} \quad (2)$$

여기에서 $p_n = (x_n, y_n) = (r_n \cos \phi_n, y_n \sin \phi_n)$ 은 n 번째 좌표값에 해당한다. 노이즈를 제거한 데이터를 시각화하기 위해 클러스터링 알고리즘 중 하나인 ABD (Adaptive Breakpoint Detector) 알고리즘을 사용한다[9]. 그림 3은 ABD 알고리즘을 보인다. 이웃하는 두 포인트 사이의 거리를 구하고 적절한 임계값(threshold)을 통해 브레이크 포인트를 구하면 라이다 센서의 포인트 클라우드 데이터를 군집할 수 있다. 하지만 임계값이 변하지 않는 고정 값이라면 포인트가 모여 있는 일정거리에서는 적절하게 동작하겠지만 장애물의 거리가 충분히 멀어지게 되면 하나의 물체에 해당하는 데이터가 서로 다른 클러스터링으로 분류될 수 있다. 따라서 거리에 따라 임계값이 변하는 유동적인 방법을 선택해야 한다. 그림 3과 같이 ABD 알고리즘은 D_{max} 에 따라 클러스터링을 구축할 수 있는 방법이다.

$$D_{max} = r_{n-1} \cdot \frac{\sin(\Delta\phi)}{\sin(\lambda - \Delta\phi)} + 3\sigma_r \quad (3)$$

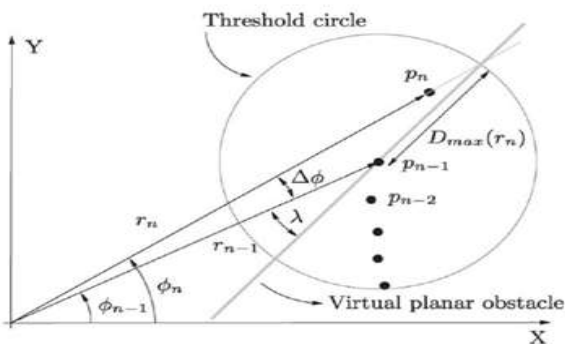


그림 3. 적응형 중지점 검출기
Fig. 3 Adaptive breakpoint detector

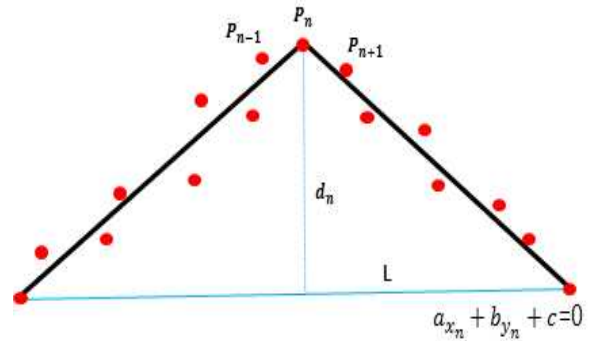


그림 4. IEPF 알고리즘을 이용한 선분 추출
Fig. 4 Line extraction using IEPF algorithm

여기에서 λ 이 적거나 σ_r 이 클수록 클러스터링의 영향 범위는 넓게 분포된다. ABD 알고리즘에서 $\|p_n - p_{n-1}\|$ 값이 D_{max} 값보다 큰 경우 p_n 과 p_{n-1} 은 브레이크 포인트가 된다. 이 경우 $p_1 \sim p_{n-1}$ 의 포인트 들은 하나의 클러스터로 취급된다.

다음으로 ABD 알고리즘을 이용하여 분류된 각각의 클러스터링에 IEPF (Iterative End-Point Fit) 알고리즘을 적용하여 선분을 추출한다 [6]. 그림 4는 IEPF 알고리즘을 보인다. IEPF 알고리즘은 각 클러스터의 처음 점과 끝 점에 선분을 연결한다. 그리고 선분과 가장 길이가 큰 수직거리 d_n 을 찾고 $d_n \geq d_{max}$ 인 경우 p_n 값을 갱신되고 선분은 두 부분으로 분리된다. 새롭게 생성된 선분은 위의 과정을 반복하면 결과적으로 클러스터 데이터 집합의 모든 점을 선분으로 연결할 수 있고 스캔한 포트홀의 형태를 추정할 수 있다.

$$L = \{l_n | n = 1, \dots, N_l\} \quad (4)$$

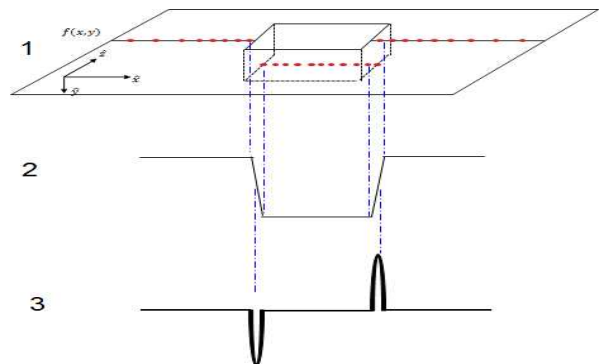


그림 5. 포트홀 선분 함수의 기울기 함수
Fig. 5 Gradient function of pothole line function

여기에서 l_n 은 n번째 선분이며 N_l 은 선분의 개수를 의미한다.

2-3 포트홀 검출

노이즈 제거를 위한 필터링 과정과 선분 추출 과정을 거쳐 클러스터 데이터 함수를 구하였다. 다음으로 추출된 선분을 연결한 데이터 함수의 x축 변화율에 대한 y축 변화율을 구한 기울기 함수를 아래와 같이 구한다.

$$F = \{f_n = \Delta y_n / \Delta x_n | n = 1, \dots, N\} \quad (5)$$

다음으로 기울기 함수를 구한 후 $|f_n| > f_{max}$ 인 경우 포트홀의 존재 유무를 판단할 수 있다. 그림 5의 경우 포트홀 측정 데이터로부터 선분 추출 과정을 거친 후 구해진 기울기 함수를 보인다.

포트홀이 존재하는 경우 $|f_n| > f_{max}$ 은 포트홀에 해당하는 선분의 경계에서 이루어지며 포트홀에 해당하는 k-번째 선분의 시작과 끝 부분에서 기준값 f_{max} 를 초과하는 변화율이 발생한다면 포트홀의 폭과 깊이는 아래와 같이 구해진다.

$$Width = \bar{l}_k = \|p_{k1} - p_{kn}\| \quad (6)$$

$$Depth = (y_{max})_{avg} - (y_{min})_{avg} \quad (7)$$

여기에서 \bar{l}_k 는 k-번째 선분의 길이, p_{k1} 은 l_k 의 첫 번째 포인트, p_{kn} 은 l_k 의 마지막 포인트에 해당한다. $(y_{max})_{avg}$ 은 포트홀 선분의 y의 평균값, $(y_{min})_{avg}$ 은 도로 선분의 y의 평균값을 의미한다.

III. 라이다기반 포트홀 검출 시스템

2D 라이다를 활용하여 구성한 실제 시스템은 그림 6과 같다. 2D 라이다는 Slamtec사의 RPLIDAR를 이용하였으며, RPLIDAR는 초당 5.5회 회전하며 각도 분해능은 1°에 해당한다. 라이다는 지면으로부터 1m 위에 수직으로 위치하며, 두 개의 라이다는 서로 1m의 간격을 유지하도록 구성하였다. 라이다를 이용하여 측정할 도로의 폭은 3m, 포트홀은 $0.3 \times 0.3 \times 0.15 m^3$ 의 크기를 가정하였다.

각각의 라이다는 아두이노를 활용하여 PWM (pulse-width modulation) 방식으로 제어하며 시리얼 통신을 통해 거리, 각도, 정확도 등의 정보를 받는다. 아두이노는 측정값을 받아 신뢰할 수 없는 거리와 각도 정보를 제거하고 시리얼 통신을 통해 PC로 보내진다. 라이다는 지면에 수직하게 스캐닝 하면서 거리 및 각도 정보를 구하기 때문에 포트홀이 없는 경우 기울기 값의 급격한 변화가 없지만 포트홀이 존재하는 경우 기울기 값의 급격

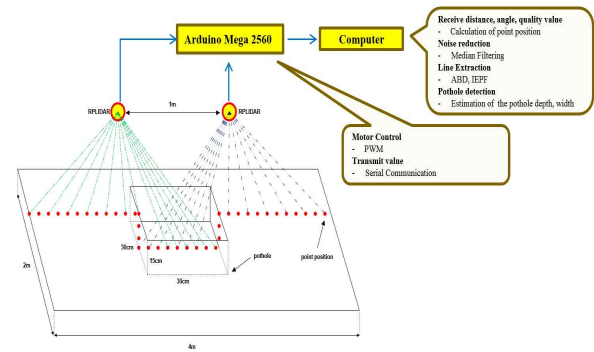


그림 6. 2D 라이다 기반 포트홀 검출 시스템
Fig. 6 2D Lidar based pothole detection system

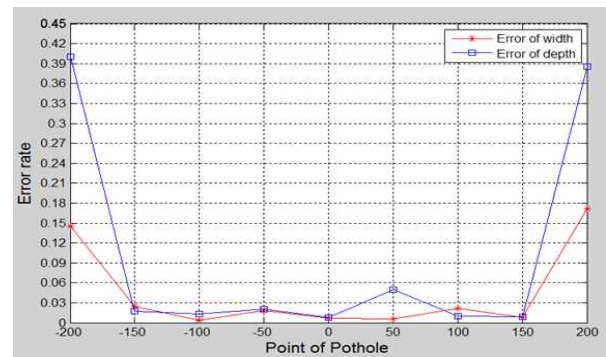


그림 7. 한 개의 라이다를 이용한 포트홀 검출 시스템의 상대 오차
Fig. 7 Relative error of pothole detection system with one LiDAR

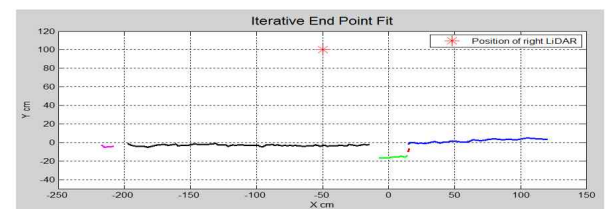
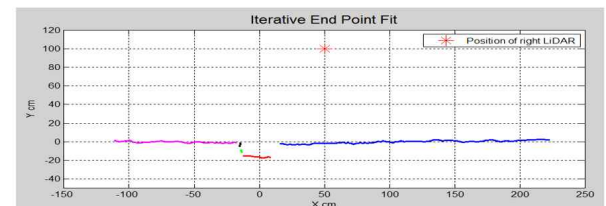


그림 8. IEPF 알고리즘을 이용한 선분 추출
Fig. 8 Line segment extraction using IEPF algorithm

한 변화를 얻을 수 있다. 이 그래프를 통해서 포트홀의 양 끝점을 추정할 수 있다.

그림 7은 1 개의 라이다를 사용하여 포트홀 검출하고자 하는 경우 포트홀의 폭과 깊이 정보에 대한 상대오차값을 보여준다. 1 개의 라이다를 사용하는 경우 중앙으로부터 1.5m까지는 LiDAR의 오차범위 내에서 에러가 발생하지만 1.5m를 벗어나는 경우 LiDAR의 시야각으로 인해 측정된 거리 정보가 부정확한 값을 보인다. 포트홀의 폭(W)의 경우 상대오차(η)는 다음과 같이 구해진다.

$$\eta = \left| 1 - \frac{W_{appro}}{W_{real}} \right| \quad (8)$$

다음으로, 측정 범위를 확대하고 포트홀 측정 오차를 줄이기 위해 2개의 라이다를 이용한 포트홀 검출 시스템을 구성하였다. 차선의 중앙에 포트홀을 위치시키고 2개의 라이다 기반 포트홀 검출 시스템을 이용하여 포트홀을 검출하는 경우 그림 8과 같이 IEPF 알고리즘을 이용하여 선분 추출을 할 수 있다.

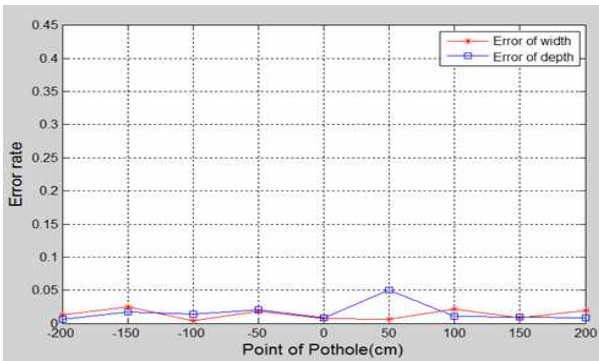


그림 9. 두 개의 라이다를 이용한 포트홀 검출 시스템의 상대 오차

Fig. 9 Relative error of pothole detection system with two LiDAR

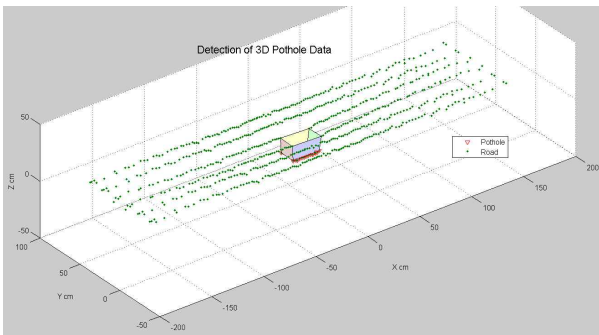


그림 10. 2.7km/h의 속도로 이동중 포트홀 검출

Fig. 10 Pothole detection when moving with velocity 2.7 km/h

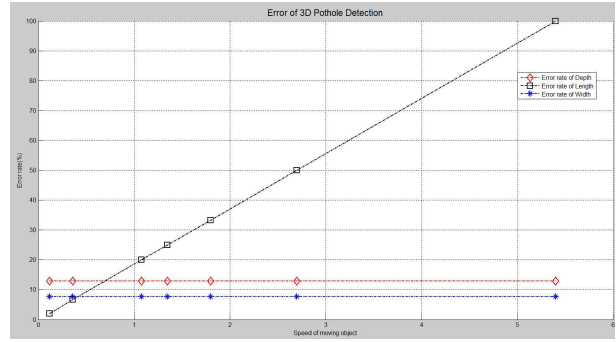


그림 11. 속도별 포트홀 검출 시스템의 상대 오차

Fig. 11 Relative error of pothole detection system with various velocity

중앙에 위치한 포트홀을 사선에서 측정하는 경우 포트홀의 한쪽 면에 대한 거리 측정과 선분 추출이 이루어지지 않는다. 반면에, 두 개의 라이다 정보를 결합시킴으로써 넓은 구간에 대해 정확한 포트홀 검출과 포트홀 정보 추출이 가능하다. 그림 9는 두 개의 라이다를 활용한 포트홀 검출 시스템의 상대오차값을 보인다. 두 개의 라이다 기반 포트홀 검출 시스템이 도로의 폭 4m 구간에 대해서 정확한 측정이 이루어짐을 알 수 있다.

다음으로 라이다 기반 포트홀 검출 시스템을 이용하여 이동 중 3차원 포트홀의 검출 및 정보 구현을 진행하였다. RPLIDAR의 경우 초당 5.5회 회전을 하기 때문에 고속으로 이동하며 포트홀을 검출할 수 없지만 이동 중 포트홀 검출 가능성을 보인다. 그림 10은 이동체가 2.7 km/h의 속도로 이동하며 측정하는 경우 검출된 포트홀의 형태를 보인다. 저가형 2D 라이다의 경우 보행 속도에서 3차원 형태의 포트홀 검출이 가능하며 에러율은 증가함을 보인다.

2D 라이다를 이동하며 포트홀 데이터 측정 및 포트홀 검출을 통해 3차원 형태의 포트홀을 구현할 수 있음을 알 수 있다. 포트홀 검출 시스템의 이동 속도에 따른 포트홀 검출 시스템의 상대 오차값을 그림 11에서 보인다. 1.08 km/h로 이동시 길이 에러는 20%, 2.7 km/h로 이동시 길이 에러는 50%로 증가함을 보인다. 반면에, 폭과 깊이 정보는 에러율의 변동이 없다. 이동 속도가 증가할수록 포트홀의 검출이 어려워지고 측정된 포트홀 정보의 오차가 증가함을 알 수 있다.

IV. 결론

본 논문에서는 2D LiDAR를 이용해 도로노면을 스캐닝하여 포트홀을 검출하는 알고리즘을 제안하고 시스템을 구현하였다. 제안된 포트홀 알고리즘은 2D 라이다를 통해서 얻은 데이터에서 노이즈를 제거하는 필터링 단계, 포인트 클라우드 데이터로부터 클러스터링을 통해 선분을 추출하는 단계, 선분함수의 1차 미분을 통해 기울기 함수를 구하는 단계, 기울기 함수

의 특징점을 찾아서 포트홀의 존재 여부를 판단하고 포트홀의 폭과 깊이 정보를 추출하는 단계로 이루어져있다. 다음으로, 2D 라이다 2개를 결합하여 포트홀 검출 시스템을 구현하였다. 1개의 라이다를 이용한 시스템보다 포트홀의 폭과 깊이 정보에 대한 상대오차가 우수함을 보였다. 마지막으로, 이동중 포트홀 검출 실험을 통해 3차원 포트홀 검출 및 정보 추출이 가능함을 보였다.

감사의 글

본 연구는 미래창조과학부 및 정보통신기술진흥센터의 대학ICT연구센터육성지원사업의 연구결과로 수행되었음 (IITP-2017-2016-0-00314)

참고문헌

[1] J. S. Miller and W. Y. Bellinger, "Distress identification manual for the long-term pavement performance program," FHWA-RD-03-031, Federal Highway Administration, Washington D.C., USA, 2003.

[2] T. Kim and S.-K. Ryu, "Review and analysis of pothole detection methods," *International Journal of Information and Communication Engineering*, Vol. 5, No. 8, pp. 603-608, Aug. 2014.

[3] J. Eriksson, L. Girod, B. Hull, R. Newton, S. Madden, and H. Balakrishna, "The pothole patrol: using a mobile sensor network for road surface monitoring," in *Proceedings of the 6th International Conference on Mobile Systems, Applications, and Services*, pp. 29-39, 2008.

[4] K. T. Chang, J. R. Chang, and J. K. Liu, "Detection of pavement distress using 3D laser scanning technology," in *Proceedings of the ASCE International Conference on Computing in Civil Engineering*, pp. 1-11, 2005.

[5] C. Koch and I. Brilakis, "Pothole detection in asphalt pavement images," *Advanced Engineering Informatics*, Vol. 25, pp. 507-515, 2011.

[6] S.-K. Ryu, T. Kim, and Y.-R. Kim, "Image-based pothole detection system for ITS service and road management system," *Mathematical problems in engineering*, Article ID 968361, pp. 1-10, 2015.

[7] J. Park and Y. G. Seo, "Extracting the slope and compensating the image using edges and image segmentation in real world image," *Journal of Digital Contents Society*, Vol. 17, No. 5, pp. 441-448, 2016.

[8] M. A. Markom, S. A. A. Shukor, A. H. Adom, E. S. M. M.

Tan, and A. Y. M. Shakkf, "Indoor scanning and mapping using mobile robot and RP lidar," *Int'l journal of advances in mechanical and automobile engineering*, Vol. 3, No. 1, pp. 42-47, 2016

[9] G. A. Borges and M.-J. Aldon, "Line extraction in 2D range images for mobile robotics," *Journal of intelligent and robotic systems*, Vol. 40, No. 3, pp. 267-297, 2004.



김정주(Jeong-joo Kim)

2017년 : 전남대학교 (공학석사)

2017년~현재 : (주)만도, 연구원
※관심분야 : 레이더, 라이다, 신호처리 등



강병호(Byung-hoo Kang)

2017년 : 전남대학교 (공학학사)

2017년~현재 : 전남대학교 전자컴퓨터공학부 석사과정
※관심분야 : LiDAR, IoT 등



최수일(Su-il Choi)

1992년 : 한국과학기술원 (공학석사)

1999년 : 한국과학기술원
(공학박사-전자공학)

1999년~2004년: 한국전자통신연구원
2004년~현재 : 전남대학교 전자컴퓨터공학부 교수
※관심분야 : 광통신, 가시광통신, IoT 등