

레이저 스캐너의 틸트 각도 조절을 통한 다양한 환경에서의 연석 탐지 및 추종

Curb Detection and Following in Various Environments by Adjusting Tilt Angle of a Laser Scanner

이 동 욱, 이 용 주, 송 재 복*, 백 주 현, 유 재 관
(Dong-Wook Lee¹, Yong-Ju Lee¹, Jae-Bok Song¹, Joo-Hyun Baek², and Jae-Kwan Ryu²)

¹Korea University
²LIG Nex1

Abstract: When a robot navigates in an outdoor environment, a curb or a sidewalk separated from the road can be used as a robust feature. However, most algorithms could detect the curb only in the straight road, and could not detect highly curved corners, ramps, and so on. This paper proposes an algorithm which enables the robot to detect and follow the curbs in various types of roads. In the proposed method, the robot tilts a laser scanner and computes the error between the predicted and the measured distances to the road in front of the robot. Based on this error, the curbs at corners and curves can be classified. It is also difficult to detect a curb near a ramp because of its low height. In this case, the robot also tilts a laser scanner to detect the curb beyond the ramp. Once the robot classifies the road into the curve, corner, ramp, the robot selects the proper navigation strategies depending on the classified road types and is able to continue to detect and follow the curb. The results of a series of experiments show that the robot can stably detect and follows the curb in curves, corners and ramps as well as the straight road.

Keywords: outdoor navigation, curb detection, curb following

I. 서론

로봇이 이동하면서 주어진 업무를 수행하기 위해서는 지도작성, 위치추정, 경로계획, 장애물회피 등의 다양한 기능이 요구된다[1]. 이를 위해 로봇은 여러 센서를 사용하여 주위환경에 대한 정보를 수집하고, 이 정보를 바탕으로 로봇이 쉽게 인식할 수 있는 특징을 추출한다. 일반적으로 실내환경에서 로봇은 센서를 사용하여 벽, 문, 가구 등을 탐지하여 특징으로 활용하지만, 이와 같은 특징이 적게 존재하는 실외환경에서는 도로와 인도의 경계를 나타내는 연석(curb)이 유용한 특징으로 활용될 수 있다.

실외환경에서 연석을 탐지하기 위해 다양한 센서가 사용된다[2-4]. 스테레오 카메라를 이용하여 획득한 영상에서 도로와 인도의 깊이 차이를 사용하여 연석을 탐지하거나[2], 획득한 깊이 정보를 이용하여 작성한 DEM (Digital Elevation Map)에서 연석을 탐지하는 방법이 연구되었다[3]. 스테레오 카메라는 주변환경에 대한 정보를 영상으로 쉽게 획득할 수 있지만, 빛의 변화에 민감하여 조명이 급격하게 변하거나 어두운 밤에는 사용이 어려운 단점이 있다. 레이저 스캐너를 사용하면 빛의 변화에 관계 없이 센서의 주변환경에 대한 정확한 거리 정보를 획득할 수 있고, 획득한 거리정보에 허프

변환(hough transform)이나 히스토그램에 기반한 연석 탐지 기법을 적용할 수 있다[5,6]. 그밖에 TOF-image 센서나 3D PMD 센서를 이용하여 연석을 탐지하기도 한다[7,8].

기존의 연구는 주로 직선도로에서 연속적으로 존재하는 연석을 탐지하여 주행하기 때문에 연석이 탐지되지 않는 환경(급격한 커브, 코너, 램프)를 주행하는 데 있어서 어려움이 있었다. 본 연구에서는 기존의 허프 변환을 이용하여 연석을 탐지하는 알고리즘을 개선하여 좀 더 신뢰성 있게 연석을 탐지하고, 앞서 언급한 연석이 탐지되지 않는 환경을 주행할 경우 레이저 스캐너의 틸트 각도를 조절하여 현재 감지하고 있는 지면보다 전방의 지면을 감지하여 환경을 구분하고, 이에 따라 연석을 탐지하기 위한 적합한 주행행동을 통하여 계속해서 연석을 탐지하고 추종하는 방법에 대하여 제안한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II 장에서는 허프변환을 이용한 연석 탐지와 탐지된 연석을 추종하는 방법에 대해 설명하고, III 장에서는 연석이 발견되지 않는 환경에서 적합한 주행행동을 선택하는 방법에 대해 설명한다. IV 장에서는 실험 환경과 결과에 대해 기술하고, 마지막 V 장에서는 전체 내용에 대한 요약과 결론에 대해 서술한다.

II. 연석 탐지 및 추종

연석을 탐지하기 위해서 로봇에 장착된 레이저 스캐너는 그림 1과 같이 중심축으로부터 지면을 향해 α_{\min} 만큼 기울어져 있으며, 이 각도에 따라 레이저 스캐너가 감지하는 지면까지의 거리가 달라진다. 레이저 스캐너는 로봇 정면의 180° 범위의 환경을 탐지할 수 있고, 레이저 스캐너의 각도 해상도인 1° 또는 0.5°를 선택하여 사용할 수 있다.

* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수: 2010. 4. 1., 수정: 2010. 7. 5., 채택확정: 2010. 9. 2.

이동욱: 고려대학교 메카트로닉스 학과(dlehdnr86@korea.ac.kr)

이용주, 송재복: 고려대학교 기계공학부

(yongju_lee@korea.ac.kr/jbsong@korea.ac.kr)

백주현, 유재관: LIG 넥스원(주) 연구개발본부

(joohyunbaek@lignex1.com/jaekwan_ryu@lignex1.com)

* 본 연구는 (주)LIG 넥스원의 지원으로 수행하는 산학과의 일환으로 수행되었음.

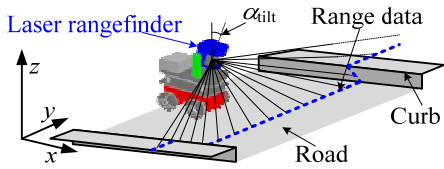


그림 1. 기울어진 레이저 스캐너로 얻은 거리 정보의 분포.
Fig. 1. Distribution of range data by tilted laser rangefinder.

1. 허프 변환을 통한 연석의 위치 탐지

그림 1과 같이 일반적인 도로에서 기울어진 레이저 스캐너를 이용하여 획득한 측정점은 2차원 평면에서 그림 2(a)와 같이 분포한다. 측정점을 관찰하면, 가장 긴 직선이 도로에 해당하며, 이 직선의 양 끝에서 도로와 인도의 높이 차이 때문에 수직으로 연석의 측면을 측정한 측정점이 존재한다. 이와 같은 분포를 고려하여 측정점이 구성하는 가장 긴 직선을 찾아서[5], 이 직선으로부터 연석의 위치를 추정할 수 있다. 이 직선은 측정점에 허프 변환(hough transform)을 적용하여 찾는다. 허프 변환은 일정 범위 내의 모든 직선에 대하여 가장 많은 데이터를 포함하고 있는 직선을 선택함으로써 데이터가 구성하고 있는 직선을 추출하는 알고리즘이다.

측정점을 지나는 직선은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\rho = x_n \cos\theta + y_n \sin\theta \quad (1)$$

여기서 θ 는 x 축과 측정점을 지나는 직선이 이루는 각도로 $[0, 180^\circ]$ 의 범위를 갖고, ρ 는 원점과 직선 사이의 거리로 $[0, 4]$ 의 범위를 갖는다. (x_n, y_n) 은 n 번째 측정점의 좌표이다. 외곽점을 제거한 모든 측정점에 대하여 0에서부터 180° 까지 0.5° 씩 변화시키며 ρ 를 계산하고, 계산된 ρ 에 따라 허프공간에 (θ, ρ) 의 값을 증가시킨다. 가장 큰 값의 (θ, ρ) 를 도로를 나타내는 직선의 θ_{road} 와 ρ_{road} 로 정의한다. 그림 2(b)는 그림 2(a)와 같이 획득된 측정점들에 대한 허프 변환의 결과를 허프 공간 상에서 표현한 그래프이다.

측정점 중에서 다음 식을 만족하는 점이 도로를 나타낸다.

$$|x_n \cos\theta_{road} + y_n \sin\theta_{road} - \rho_{road}| \leq e_{max} \quad (2)$$

식 (2)의 좌변은 n 번째 거리와 θ_{road} 와 ρ_{road} 를 사용하여 계

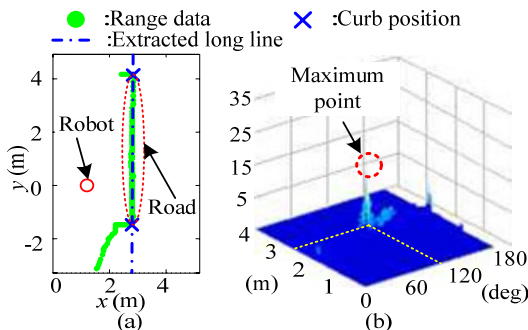


그림 2. 허프 변환에 기반한 직선 추출 결과: (a) 도로와 연석의 위치, (b) 허프 공간에서의 보팅 결과.

Fig. 2. Result of line extraction based on Hough transform: (a) position of road and curb, and (b) voting results in Hough space.

산한 직선과의 차이이고, e_{max} 는 최대 허용오차이다. 식 (2)를 만족하는 측정점은 그림 2(a)의 도로를 나타내고, 측정점의 양 끝점은 각각 좌측 및 우측 연석의 위치를 나타낸다. 이와 같이 허프 변환을 사용하면 직선 도로에서 안정적으로 연석을 탐지할 수 있다. 그러나 다양한 환경에서 연석을 탐지할 때 그림 3(a)와 같이 연석이 존재하지 않는 환경에서도 연석이 존재한다고 잘못 판단할 수 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 현재 탐지된 연석의 위치에서 측정점의 x 축 표준편차를 이용한다.

그림 3(a)와 같이 연석이 존재하지 않는 경우 연석 위치에서 측정점들의 x 축 표준편차가 작지만, 그림 3(b)와 같이 연석이 존재할 경우 표준편차가 크다. 만약, 연석의 위치에서 측정점의 표준편차가 일정 임계치의 범위 내에 존재한다면 올바르게 연석을 탐지하였다고 판단하고, 그렇지 않은 경우 연석을 탐지하지 못하였다고 판단한다. 이때 사용되는 표준편차의 임계치의 범위는 그림 4(a)와 같이 레이저 스캐너가 기울어진 각도 α_{tilt} , 연석의 높이 h_{curb} , 로봇이 탐지된 연석의

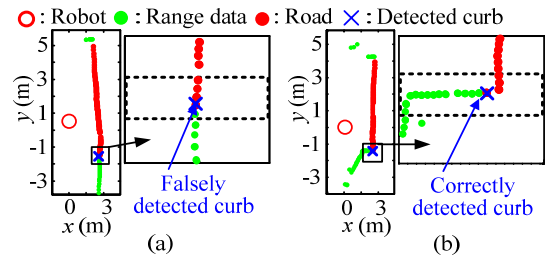


그림 3. 환경에 따른 연석 탐지 결과: (a) 연석이 존재하지 않는 환경에서 연석의 위치를 잘못 탐지한 경우, (b) 연석이 존재하는 환경에서 연석의 위치를 정확히 탐지한 경우.

Fig. 3. Results of curb detection: (a) curb falsely detected in the environment where no curb exists, and (b) correctly detected curb.

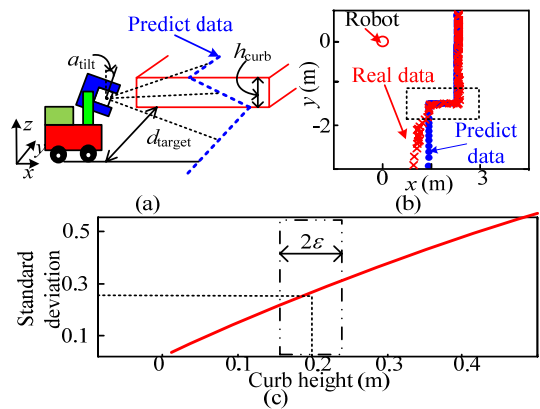


그림 4. 탐지된 연석의 위치에 대한 신뢰성 평가: (a) 예측되는 측정점 분포, (b) 예측된 측정점과 실제 측정점 분포, (c) 연석의 높이에 따른 측정점의 표준 편차.

Fig. 4. Reliability evaluation of detected curb position: (a) distribution of predicted range data, and (b) predicted range data and real measurement range data, and (c) standard deviation as function of curb height.

로부터 떨어진 거리 d_{target} 인 환경에서 예측되는 측정점의 분포(점선)를 이용하여 계산된다. 예를 들어, $\alpha_{diff}=15^\circ$, $d_{target}=1.5m$ 의 조건에서 탐지할 연석의 높이(h_{curb})가 0.2m인 경우에 예측되는 측정점의 분포(청색 원)는 그림 4(b)와 같다. 실제 획득된 측정점(빨간색 X)도 인도 부분을 제외한 영역은 비슷하게 획득됨을 알 수 있다. 예측되는 측정점의 분포에서 연석의 존재 여부를 결정하는 표준편차의 범위는 주변환경의 불확실성을 고려하여 계산한다. 그림 4(c)는 예측되는 측정점에서 계산한 연석의 높이에 따른 표준편차이다. 0.2m의 연석을 탐지할 경우, 연석의 존재 여부를 판단하는 표준편차의 값은 0.26이다. 그러나 실제 환경에서는 노면의 상태, 로봇이 탐지된 연석으로부터 떨어진 거리, 연석의 높이가 일정하지 않다. 따라서 안정적인 연석 탐지를 위한 찾고자 하는 연석 높이에 대한 표준편차에서 허용오차 ϵ 를 주어 최종적인 범위를 설정한다. 이 ϵ 가 크면 다양한 높이의 연석을 탐지할 수 있지만, 연석이 아닌 부분도 연석이라고 판단하는 문제점이 있고, ϵ 가 작을수록 사용자가 지정한 높이의 연석을 탐지하지만 환경이 조금만 변해도 연석을 탐지하지 못한다는 단점이 있다.

2. 외곽점 제거

획득되는 측정점에는 허프 변환을 이용하여 연석의 위치를 탐지하는데 방해가 되는 외곽점(outlier)이 포함되어 있으므로 이를 제거하여야 한다.

실외환경에서 도로나 인도에 대한 측정점은 직선 위에 존재하여야 하므로 직선에서 벗어난 측정점은 도로나 인도를 측정하지 않았거나, 센서의 오차로 발생한 외곽점이라고 판단할 수 있다. 이 경우 인접한 측정점 간의 거리와 각도를 이용하여 외곽점을 제거할 수 있다. 인접한 측정점 사이의 거리 d 가 일정 거리 $d_{threshold}$ 보다 크거나, 각 α 가 $\alpha_{threshold}$ 보다 작은 경우에 외곽점으로 판단하여 이들 측정점을 제거한다.

또한, 연석이 직각으로 휘어지는 커브 부분에서 허프 변환을 사용하여 추정된 연석의 위치는 부정확할 수 있다. 그림 5에서 시간 $t-1$ 과 같이 연석이 연속적으로 존재하는 부분을 주행할 경우 도로에서 추출된 직선으로부터 탐지된 연석의 위치는 정확하다. 하지만 시간 t 에서는 시간 $t-1$ 에서 연석을 감지하던 측정점이 도로를 감지하므로 추출된 직선에서 탐지된 연석의 위치는 부정확하다. 그러므로 측정점 중에서 x 축 방향으로 중복된 부분을 외곽점으로 판단하여 제거한다. 이와 같은 과정을 거쳐 외곽점이 제거된 측정점에서 허프 변환을 이용하면 다양한 환경에서 연석의 위치를 보다 안정적으로 탐지할 수 있다.

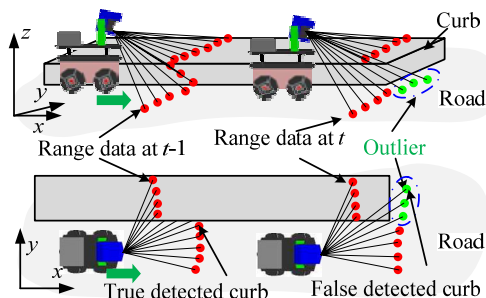


그림 5. 외곽점 제거.
Fig. 5. Elimination of outliers.

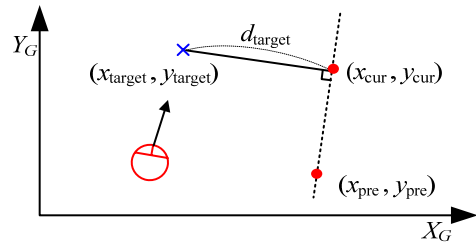


그림 6. 전역 좌표계에서의 목표점 계산.
Fig. 6. Calculation of target point in global frame.

3. 목표점 계산과 추종

탐지된 연석으로부터 일정 간격을 유지하며 추종하기 위해서는 연석과 평행한 부분에 로봇이 추종하여야 할 목표점을 설정하여야 한다. 로봇은 현재 탐지된 연석의 위치와 이전에 탐지된 연석의 위치를 사용하여 추종할 목표점을 그림 6과 같이 계산한다. 이전에 탐지된 연석의 좌표 (x_{pre}, y_{pre})와 현재 탐지된 연석의 좌표 (x_{cur}, y_{cur})를 지나는 직선의 방정식을 계산한다. 다양한 환경에서 연석을 기준하여 안전하게 주행하기 위해서는, 현재 연석의 위치에서 앞서 계산한 직선의 수직 방향으로 일정 거리 d_{target} 만큼 떨어진 점을 목표점으로 설정한다. 이 목표점까지 로봇을 안정적으로 제어하기 위하여 Kanayama가 제안한 모션제어 방법을 사용하였다[9].

III. 도로의 형태 구분 및 주행 행동 결정

앞서 언급한 방법을 이용하여 연석을 탐지하고, 탐지된 연석을 추종한다.

그림 7은 연석 탐지 및 추종 알고리즘의 순서도이다. 그러나 그림 8과 같은 환경에서는 연석을 탐지하고 추종하는 데는 어려움이 있다. 이러한 환경에서는 레이저 스캐너의 틸트 각도 조절을 통해 현재 감지하고 있는 지면보다 전방을 감지하여 환경을 구분하고, 이에 따라 연석을 탐지하기 위한 적합한 주행행동을 선택하면 계속해서 연석을 탐지하고 추종할 수 있다. 예를 들어, 그림 8(a)와 같이 코너를 발견한 경우에는 코너의 안쪽으로 회전하여 연석을 탐지하고, 그림 8(b)와 같이 커브를 발견한 경우에는 커브의 바깥쪽으로 회전하

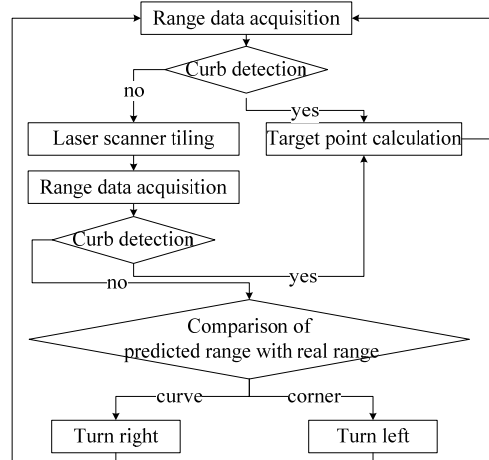


그림 7. 연석 탐지 및 추종 알고리즘의 순서도.
Fig. 7. Flow chart of curb detection and following algorithm.

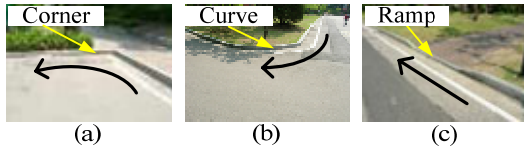


그림 8. 기존 방법으로는 연속 탐지가 어려운 환경: (a) 코너, (b) 커브, (c) 램프.

Fig. 8 Environments difficult to detect curb with conventional methods: (a) corner, (b) curve, and (c) ramp.

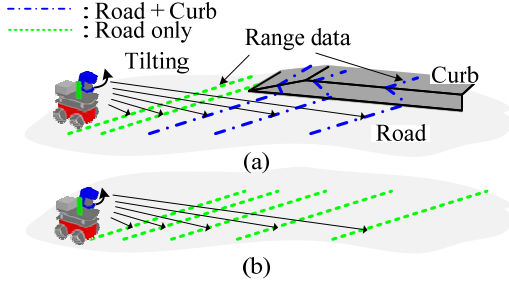


그림 9. 레이저 스캐너의 틸트각도 조절을 통한 연속 탐지: (a) 탐지되지 않은 경우, (b) 탐지된 경우.

Fig. 9. Curb detection using tilt angle control of LRF: (a) no curb detected, (b) curb detected.

여 연속을 탐지한다. 그림 8(c)와 같이 램프를 발견한 경우에는 램프 이후에 탐지된 연속을 따라 직진으로 주행한다.

연석이 연속적으로 존재하는 직선도로를 주행하는 경우에는 레이저 스캐너로부터 획득된 측정점의 분포는 앞선 그림 3(b)와 같이 도로와 인도의 높이 차이 때문에 경계가 확실하며, 허프변환을 통해 연석의 위치를 정확하게 탐지할 수 있다. 그러나 그림 8과 같이 코너, 커브 또는 램프가 존재하는 환경을 주행할 경우 레이저 스캐너는 연석이 없거나 있더라도 낮은 연석을 감지하기 때문에 그림 3(a)와 같이 획득되는 거리 정보에서 연석의 위치를 정확히 탐지할 수 없게 된다. 이와 같이 연석이 탐지되지 않는 환경에서는 더 이상 목표점을 계산할 수 없으므로 로봇은 주행을 멈추고, 그림 9와 같이 레이저 스캐너를 연속적으로 틸트하여 전방의 환경을 파악하고, 그에 알맞은 주행 행동을 선택하여야 한다. 만약 전방에 램프가 존재한다면(그림 8(c)) 그림 9(a)와 같이 레이저 스캐너를 틸트하면 램프 이후에 존재하는 연석이 탐지되므로, 로봇은 탐지된 연속으로부터 새롭게 계산된 목표점을 향해 주행할 수 있다. 그러나 그림 9(b)와 같이 연석이 탐지되지 않는 경우 로봇의 전방에는 그림 8(a) 또는 (b)와 같은 코너 또는 커브가 존재한다고 판단하고, 그림 10과 같이 레이저 스캐너에서 틸트 각도에 따라 예상되는 거리 d_{predict} 와 실제 획득된 거리 d_{real} 의 차이를 통해 코너와 커브를 구분하고, 이에 따른 주행 행동을 선택한다. d_{predict} 는 다음과 같다.

$$d_{\text{predict}} = -\frac{z_{\text{laser}} \cos(\alpha_{\text{tilt}}) + h_{\text{tilt}}}{\sin(-\alpha_{\text{tilt}})} - x_{\text{laser}} \quad (3)$$

여기서 h_{tilt} 는 현재 지면으로부터 레이저 스캐너의 틸팅축까지의 거리이고, 각각 z_{laser} 과 x_{laser} 은 틸팅축으로부터 레이저 스캐너의 중심까지의 거리이다. 로봇의 전방에 코너가 존재할

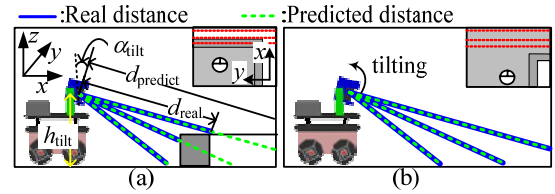


그림 10. 측정 거리와 예상 거리의 차이에 기반한 코너와 커브의 구분: (a) 코너, (b) 커브.

Fig. 10. Classification of corner and curve based on the difference between the measured and the predicted distances: (a) corner, and (b) curve.

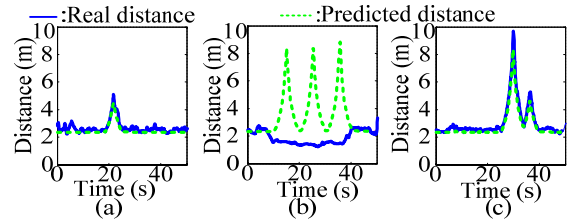


그림 11. LRF의 틸팅 중 로봇에서 전방의 지면까지의 측정거리와 예상거리: (a) 램프 또는 직선도로, (b) 코너, (c) 커브.

Fig. 11. Measurement and predicted distances from robot to front of road with tilting LRF: (a) ramp and road, (b) corner, and (c) curve.

경우 그림 10(a)와 같이 레이저 스캐너가 인도를 감지하므로 d_{predict} 와 d_{real} 간의 차이가 크다. 그러나 커브가 존재할 경우 그림 10(b)와 같이 레이저 스캐너는 도로를 감지하므로 d_{predict} 와 d_{real} 간의 차이가 작게 된다.

그림 11은 로봇이 주행하면서 로봇과 지면까지의 예상거리와 실제 측정거리를 나타낸 그래프이다. 로봇의 전방에 램프가 존재할 경우 그림 11(a)와 같이 레이저 스캐너를 틸트하는 도중 연석이 탐지되므로 틸트를 중지한다. 그러나 로봇의 전방에 코너가 존재하는 경우 레이저 스캐너를 틸트하여 전방의 지면을 감지하면 인도의 영향 때문에 그림 11(b)와 같이 실제 측정거리와 예상거리 간의 차이가 크게 된다. 반대로, 커브의 경우 전방의 도로가 감지되므로 그림 11(c)와 같이 실제 측정거리와 예상거리의 차이가 작다. 이와 같이 레이저 스캐너를 틸트하는 도중에 연석이 탐지되지 않는 경우에는 지면까지의 실제 측정거리와 예상거리의 차이가 크고 작음을 이용하여 환경을 구분할 수 있고, 이에 따른 로봇의 주행행동을 선택할 수 있다.

IV. 실험 환경 및 결과

로봇에서 전방 지면까지의 거리는 식 (3)을 이용하여 예측되는 거리 정보와 지면으로부터 레이저 스캐너의 틸팅축까지의 높이, 현재 레이저 스캐너가 틸팅하고 있는 각도를 이용하여 계산할 수 있다. II 장에서 설명한 방법을 통해 로봇은 로봇의 우측에 존재하고, 약 0.2m (일반적인 도로에서 연석의 높이는 0.25m 이하) 의 높이를 가지는 연석을 탐지하도록 설정하고, 연석의 존재 여부를 판단하는 표준편차의 임계치 범위에서 허용오차 ϵ 는 0.6으로 설정하였다. 탐지된 연석

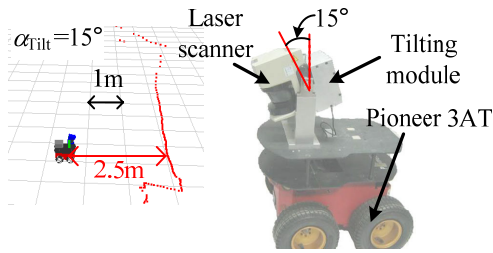


그림 12. 실험 장비.
Fig. 12. Experimental equipments.

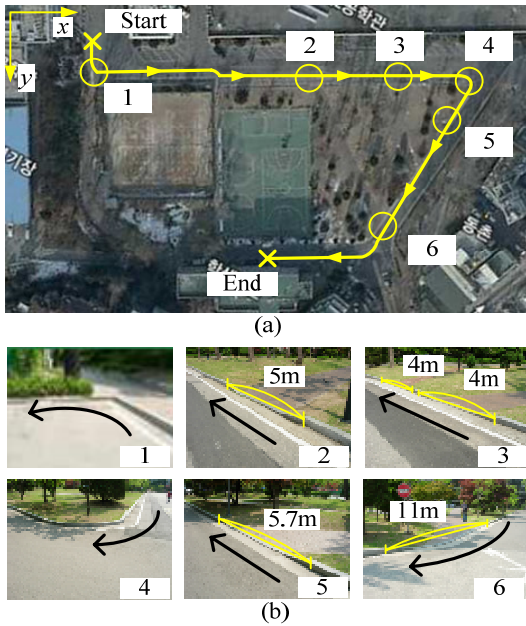


그림 13. 실험 환경: (a) 전체 환경, (b) 부분적인 환경.
Fig. 13. Experimental environment: (a) entire environment, and (b) partial environments.

으로부터 약 1.5m 떨어진 지점(최대 4m)을 최대 0.5m/s의 속도로 추종하였다. 만약 코너, 커브, 램프를 주행하는 경우 레이저 스캐너의 틸트 각도를 3°까지 조절하여 약 10m 전방의 지면까지 감지할 수 있도록 하였다.

그림 13(a)는 로봇이 연석을 탐지하고 추종하는 실험환경을 나타내며, 그림 13(b)는 코너, 커브, 램프가 존재하는 부분적인 환경을 보여준다. 그림 13(a)에 표시된 'start' 지점을 출발하여 표시된 경로를 따라 존재하는 연석을 탐지하고, 연석이 탐지되지 않은 경우에는 III 장에서 설명한 방법으로 환경을 파악한 후 적절한 행동을 선택하여 'end' 지점까지 주행하도록 하였다. 그림 13(b)에서 검은색 화살표는 각각의 환경에서 로봇의 주행하는 방향이다.

그림 14은 로봇이 실험환경을 주행하면서 계산한 실제 이동경로와 탐지된 연석의 위치이다. 엔코더만을 사용하였기 때문에 누적되는 오차는 보정되지 않았다. 로봇은 직선도로 뿐만 아니라, 연석이 발견되지 않는 코너, 커브, 램프에서도 레이저 스캐너의 틸트 각도 조절을 통하여 환경을 구분하고, 그에 따라 안정적으로 주행행동을 선택할 수 있었다.

그림 15는 그림 8과 같이 코너와 커브를 구분하기 위하여 지면까지의 예상거리와 측정거리를 비교한 결과이다. 그림

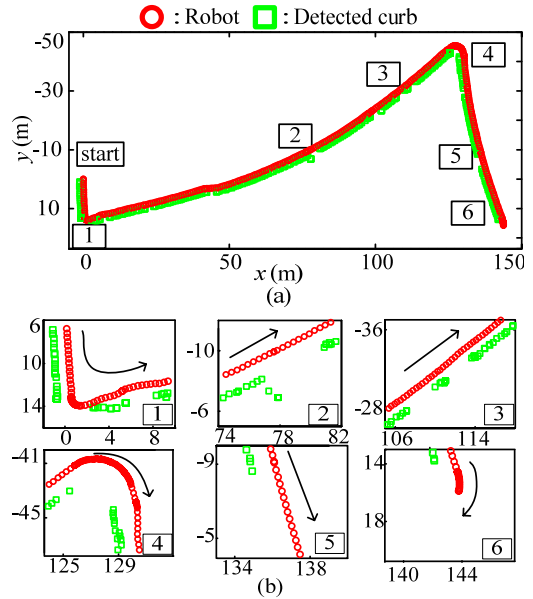


그림 14. 연석 탐지 및 추종 실험 결과: (a) 전체 경로, (b) 부분적인 경로.

Fig. 14. Experimental results of curb detection and following: (a) entire navigation path, and (b) partial path.

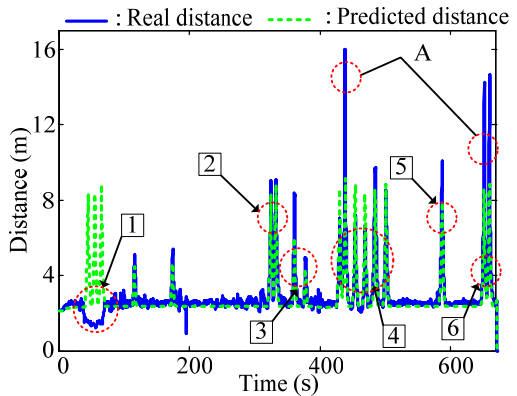


그림 15. 로봇과 전방의 지면까지 측정거리와 예상거리.
Fig. 15. Measured and predicted distances between the robot and road in front.

13(b)-1번 환경은 그림 15의 1번과 같이 예상거리와 실제거리의 차이가 크므로 코너로 판단되었고, 13(b)-4번 환경은 예상거리와 실제 거리의 차이가 작으므로 커브로 판단되었다. 그러나 로봇이 감지할 수 있는 최대 거리는 레이저 스캐너의 틸트 각도에 따라 결정되기 때문에 구분할 수 있는 거리에는 한계가 있다. 본 연구는 3°까지 레이저 스캐너의 틸트 각도를 조절하여 약 10m 앞까지 감지가 가능하기 때문에 그림 13(b)-6과 같이 그 이상의 폭을 가지는 램프에서는 램프 이후에 존재하는 연석을 탐지하지 못하고 램프를 커브로 판단하는 문제점이 발생하였다. 또한, 먼 거리를 감지할 경우 나타나는 레이저 스캐너의 불확실성 증가나 지면의 굴곡으로 인해 정확한 거리 정보를 얻을 수 없을 경우 실제거리가 그림 15의 A 지점과 같이 현재의 틸트 각도에서는 나올 수 없는 큰 값을 가질 수 있다. 이러한 값은 코너와 커브 판단에 활용하면 잘못된 결과를 얻을 수 있으므로 고려하지 않았다.

V. 결론

본 연구에서는 실외환경에서 강한 특징으로 사용될 수 있는 연석을 탐지하고 추종하고, 연석이 탐지되지 않는 환경에서 레이저 스캐너의 틸트 각도 조절 및 로봇의 주행행동 선택을 통해 계속해서 연석을 탐지하고 추종하는 방법을 제안하였다. 기존 방법으로 연석을 탐지하지 못하는 코너나 커브와 같은 환경에서도 제안한 방법으로는 레이저 스캐너를 틸트 각도를 조절하며 지면까지의 예상거리와 실제 측정거리를 비교하여 코너와 커브를 구분할 수 있고, 그에 적합한 주행행동을 선택하여 지속적으로 연석을 추종할 수 있다. 또한, 연석이 불연속적인 램프에서도 램프 이후의 연석을 탐지하여 자연스러운 주행이 가능하다. 그러나 레이저 스캐너로 먼 거리를 탐지할 경우 거리 정보의 불확실성이 커져 폭이 넓은 램프에서는 연석을 감지하기 어려운 단점이 있다. 이러한 문제는 추후 연구에서 다른 센서와의 융합으로 해결하고자 한다.

참고문헌

- [1] R. Siegwart and I. R. Nourbakhsh, "Autonomous mobile robots," MIT Press, Cambridge, 2004.
- [2] C. James, M. Roberto, and S. Huiying, "Computer vision-based terrain sensors for blind wheelchair users," *Lecture Notes in Computer Science*, vol. 4061, pp. 1294-1297, 2006.
- [3] O. Florin, N. Sergiu, and M. M. Marc, "Curb detection based on elevation maps from dense stereo," *Proc. of 2007 IEEE International Conference on Intelligent Computer Communication and Processing*, pp. 119-125, Sep. 2007.
- [4] W. S. Wijesoma, K. R. S. Kodagoda, and A. balasuriya, "Road-boundary detection and tracking using lidar sensing," *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, vol. 20, no. 3, pp. 456-464, Jun. 2004.
- [5] S. H. Kim, C. H. Roh, S. C. Kang, and M. Y. Park, "Outdoor navigation of a mobile robot using differential GPS and curb detection," *Proc. of 2007 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Roma, Italy, pp. 3414-3419, Apr. 2007.
- [6] R. Aufreire, C. Mertz, and C. Thorpe, "Multiple sensor fusion for detecting location of curbs, walls, and barriers," *Proc. of IEEE Intelligent Vehicles Symposium 2003*, pp. 126-131, Jun. 2003.
- [7] O. Gallo, R. Manduchi, and A. Rafii, "Robust curb and ramp detection for safe parking using the canesta TOF camera," *Proc. of 2008 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops*, pp. 1-8, Jun. 2008.
- [8] U. Scheunert, B. Fardi, N. Mattern, G. Wanielik, and N. Keppeler, "Free space determination for parking slots using a 3D PMD sensor," *Proc. of 2007 IEEE Intelligent Vehicles Symposium*, Istanbul, pp. 154-159, Jun. 2007.
- [9] Y. Kanayama, Y. Kimura, F. Miyazaki, and T. Noguchi, "A stable tracking control method for an autonomous mobile robot," *Proc. of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Cincinnati, pp. 384-389, May 1990.

이 동 욱



2009년 광운대학교 전자공학과(공학사). 2009년~현재 고려대학교 대학원 메카트로닉스학과 석사과정 재학중. 관심분야는 이동로봇의 위치추정.

이 용 주



2004년 고려대학교 기계공학과(공학사). 2004년~현재 동 대학원 기계공학부 석박사통합과정 재학중. 관심분야는 이동로봇의 지도작성 및 위치추정, 실외주행.

송 재 복



설계 및 제어.

1983년 서울대학교 기계공학과(공학사). 1986년 서울대학교 기계공설계학과(공학석사). 1992년 MIT 기계공학과(공학박사). 1993년~현재 고려대학교 기계공학부 교수. 관심분야는 이동로봇의 주행, 안전 머니플레이터, 지능로봇 시스템의

백 주 현



웨어블 로봇, 실외주행 알고리즘.

1989년 한양대학교 기계설계학과(공학사). 1991년 한양대학교 기계설계학과(공학석사). 2002년 한국과학기술원(KAIST) 기계공학과(공학박사). 1991년~현재 LIG 넥스원(주) 연구개발본부 수석연구원. 관심분야는 소형 무인차량,

유 재 관



2004년 경희대학교 기계공학과(공학 석사). 2005년 JAIST 정보과학연구과(공학박사). 2005년~현재 LIG 넥스원(주) 연구개발본부 선임연구원. 관심분야는 웨어러블 로봇, 휴머노이드, 모바일 머니플레이션.