

야외 순찰로봇을 위한 단일 레이저거리센서 기반 충돌 회피 주행 제어기법 개발

Motion Control of an Outdoor Patrol Robot using a Single Laser Range Finder

홍 승 범, 신 유 진, 정 우 진*

(Seung-bohm Hong, Youjin Shin, and Woojin Chung)

Abstract: This paper reports the development of a mobile robot for patrol using a single laser range finder. A Laser range finder is useful for outdoor environment regardless of illumination change or various weather conditions. In this paper we combined the motion control of the mobile robot and the algorithm for detecting the outdoor environment. For obstacle avoidance, we adopted the Vector Field Histogram algorithm. A laser range finder is mounted on the mobile robot and looking down the road with a small tilt angle. We propose an algorithm for detecting the surface of the road. The outdoor patrol robot platform is equipped with a DGPS system, a gyro-compass sensor, and a laser range finder. The proposed obstacle avoidance and road detection algorithms were experimentally tested in success.

Keywords: outdoor patrol robot, motion control, field detection

I. 서론

현대 사회는 과거에 비해 보안 및 경비의 중요성이 점차 증대되고 있다. 사회가 발전함에 따라 보안이 요구되는 영역의 범위 또한 다양해 지고 있는 실정이다. 특히 야외 환경의 경우에는 날씨가 춥거나 어두울 때와 같이 개인이 순찰하기에 어려운 점이 많다. 로봇이 야외에서 자율적으로 순찰 및 경비 업무를 시행하게 되면 순찰 업무를 수행함에 있어서 부담이 경감될 것이다. 이에 따른 야외 순찰로봇에 대한 관심이 높아지고 있다.

야외 자율 순찰로봇을 개발하기 위해 처음으로 고려되어야 할 부분은 주행 제어이다. 경비 업무를 하기 위해서는 로봇이 장애물을 회피하여 원하는 경로로의 주행을 이루어져야 한다. 본 논문은 야외 주행 로봇을 위한 주행 제어 알고리즘 및 효율적인 주행을 위한 주위 환경 인식에 대한 연구를 수행하였다.

자율주행을 위한 주행 알고리즘의 개발 분야는 지속적으로 연구되어 왔다. 이 중 vector field histogram[1]은 자율주행에서 가장 널리 이용되고 있는 알고리즘 중 하나이다. 센서 정보를 바탕으로 로봇이 주행할 수 있는 영역과 주행할 수 없는 영역을 구분하여, 주행 가능한 영역 중에서 목표와 가까운 영역으로 매 순간 주행을 이루어 진다. 이 알고리즘은 비교적 간단하여 운용이 편리하다는 장점을 가진다. 하지만, 전역적 최적 경로로의 이동이 보장되지 않는다는 단점이 있다. Potential field method[2]는 환경을 potential field로 나타내어 로봇이 낮은 potential로 움직이도록 제어하는 알고리즘이다. 하지만 장애물이 등장하면 potential field를 계속 갱신해야 하기 때문에 동적 장애물이 많은 환경에서는 적용이 어렵다.

dynamic window approach[3]는 매 순간 로봇의 상태로부터 가능한 속도 영역을 계산함으로써 로봇의 주행이 이루어 진다. 때문에 고속 주행을 위한 제어가 용이하다는 장점을 가진다. 하지만 제시 되는 파라미터의 조율을 통해서만 성능이 보장되기 때문에 모르는 환경에서의 주행에는 사용하기 어렵다. 이 밖에 주행하고자 하는 궤적을 미리 생성하여 이를 추종하는 주행 알고리즘도 연구되어 왔다. 이 중에서 non-holonomic system을 제어하는 연구로는 Kanayama[4]에 의해 제안된 알고리즘이 많이 이용되고 있다. Kanayama Tracking Control은 궤적을 생성한 후 주행이 이루어지기 때문에 전역적 최적 경로를 보장한다. 하지만 위치 추정 정밀도에 의한 영향을 많이 받기 때문에 실외 환경주행에는 부적합하다. Gradient method [5]는 널리 이용되고 있는 경로 생성 기법 중 하나이다. 로봇의 주행환경을 격자로 표현하여 wave-front에 의한 경로를 생성한다. 이 방법 또한 동적 장애물이 존재할 경우 경로를 재 생성 해야 하는 문제 때문에 동적인 실외 환경에서 이용하기에 어려움이 있다.

실외 순찰로봇에 관하여 최근에 진행된 연구로는 야외 도로환경에서 연석을 추출하여 주행에 이용한 논문이 있었다 [6]. 하지만 동적 장애물 회피를 위해 추가적인 레이저 센서가 필요하였다. [7]의 경우에도 장애물이 많이 존재하는 실외 환경에서의 효과적인 지표면 추출이 가능하였으나 알고리즘을 수행하기 위해서는 여러 개의 센서 장착을 필요로 하였다. 그 외에 연석을 추출하여 신뢰성 있는 자율주행에 관한 연구들이 있었다[8,9]. 이 논문의 경우 연석이 모두 존재 하지 않는 경우 주행이 어렵다. 따라서 이번 논문에서는 지표면을 추출함으로써 연석의 존재 여부에 민감하지 않고 하나의 레이저를 기울여 장착함으로써 지표면 추출과 장애물 회피가 동시에 가능하도록 하였다.

본 논문은 위의 자율주행 알고리즘들 중에서 VFH (Vector Field Histogram)을 사용하여 주행 제어를 시도하였다. VFH는 미리 주어지지 않은 환경에 대한 대응이 가능하며 계산시간

* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수: 2009. 2. 1., 수정: 2009. 4. 14., 채택확정: 2010. 1. 7.

홍승범, 신유진, 정우진: 고려대학교 기계공학부

(hova83@korea.ac.kr/meggonagul@korea.ac.kr/smartrobot@korea.ac.kr)

※ 본 연구는 지식경제부 융복합형로봇전문인력양성사업의 지원을 받아 수행되었음.

이 빠르기 때문에 동적 장애물 회피에도 적합하다. 본 연구는 준 구조화된 도로환경에서의 주행을 목적으로 하였기 때문에 전역적 최적 경로의 생성이 특별히 요구되지 않는다. 실의 환경은 실내와 달리 정적인 환경이 아니기 때문에 매 순간 장애물 탐지 외에 주행 가능한 영역을 파악해야 할 필요성이 있다. 이를 보완하기 위해 레이저 센서를 이용한 지표면 추출 알고리즘을 정리하여 제시하였다. 또한, 야외 순찰 로봇의 플랫폼을 제작하여 실제 환경에서의 실험을 수행하여 우리의 주행 제어 기법의 타당성을 입증하였다.

이 논문의 구성은 다음과 같다. 제 II 장에서는 VFH 알고리즘에 대한 설명과 야외 주행을 위한 추가 부분을 언급하고, 제 III 장에서는 로봇 플랫폼에 대한 설명과 실제 실험 결과를 분석한다. 마지막으로 제 IV 장에서 결론이 언급된다.

II. 주행 제어 알고리즘

1. Vector Field Histogram [J. Borenstein, 1991]

주행 제어에 관한 알고리즘의 종류는 많다. 이 중에서 우리가 야외 주행을 위해 VFH (Vector Field Histogram)를 사용하 이유는 먼저, 그 알고리즘의 단순함에 있다. 야외 환경에서의 주행의 경우 다양한 환경에 대처하기 위해서는 무엇보다 빠른 상황 판단이 필요하기 때문이다. 지금까지 연구된 방법들 중에서 주행을 제어하기 위해서는 지도 등 환경에 대한 정보를 미리 알아야만 하는 경우가 있었다. 하지만 VFH의 경우 다른 알고리즘들에 비해서 계산 양이 적고 환경에 대한 정보를 미리 알고 있지 않은 상태에서도 매 순간 센서를 통해 얻은 정보로부터 주행 제어가 가능하다는 장점을 가진다. 또한

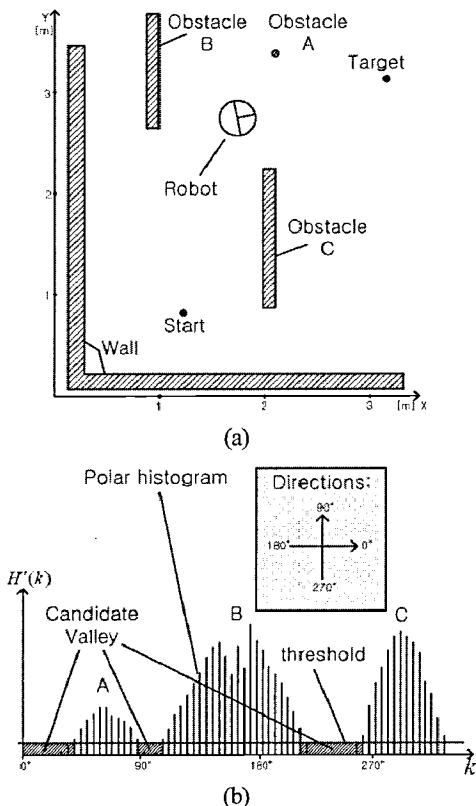


그림 1. 벡터필드히스토그램 기법의 설명[1].
Fig. 1. Illustration of Vector Field Histogram Approach in [1].

동적인 장애물에 대한 회피가 빠르게 이루어 지기 때문에 야외 환경에서의 주행 시 안정성이 확보될 수 있다.

VFH 알고리즘은 다음과 같은 제어 구조를 가진다. 먼저, 거리 측정 센서 정보로부터 주위 장애물의 정보를 얻게 되면, 이를 통해서 주행 가능한 영역을 계산하게 된다.

로봇과 로봇의 주위의 환경이 그림 1(a)와 같다면, 초음파 센서(ultrasonic sensor)나 단일 거리 측정 센서(laser range finder)와 같은 거리 측정 센서를 통해서 주위의 장애물에 대한 거리 값을 얻게 된다. 그리고 로봇을 중심으로 모든 각도에 대한 거리 값을 (1)과 (2)을 사용하여 polar histogram 형식으로 바꾸게 된다.

$$H(k) = \sum_{i,j} m_{i,j} \tag{1}$$

$$m_{i,j} = (c_{i,j}^*)^2 (a - bd_{i,j}) \tag{2}$$

where

- a, b Positive constants.
- $c_{i,j}^*$ Certainty value of active cell (i, j) .
- $d_{i,j}$ Distance between active cell (i, j) and the obstacles.
- $m_{i,j}$ Magnitude of the obstacle vector at cell (i, j) .

그림 1(a)의 환경을 Polar Histogram 으로 변환하게 된 그래프는 그림 1(b)와 같다. 그리고 $H(k)$ 값에 대한 제한 값 (threshold)을 정하여 그 값보다 작은 값을 가지는 영역을 로봇이 장애물에 부딪히지 않고 주행할 수 있는 후보 영역들로 나눈다. 그 영역들의 묶음을 ‘후보 영역(candidate valley)’으로 정하게 된다.

2. VFH 알고리즘에 대한 보완

첫 번째 보완 부분은 장애물 회피를 하기 위해 로봇의 크기를 고려하여 가상으로 장애물의 크기를 확장하는 부분이며, 그림 2에 개략적인 그림이 나와 있다.

위 그림에서 $\theta \approx r/d$ 식을 사용하여 로봇이 장애물과 충돌하지 않고 주행할 수 있는 θ 값을 계산하여 주행 가능 영역의 크기를 θ 값 만큼 축소하였다.

3. 레이저 거리 센서를 이용한 지면 인식

본 논문에서 구축한 로봇 플랫폼은 단일 거리 측정 센서를 사용하여 장애물을 인식한다. 또한 주행 영역을 파악하기 위해서는 지면도 추출해야 하는데 이를 위해 단일 거리 측정 센서를 기용여 장착하였다. 단일 거리 측정 센서를 지면과

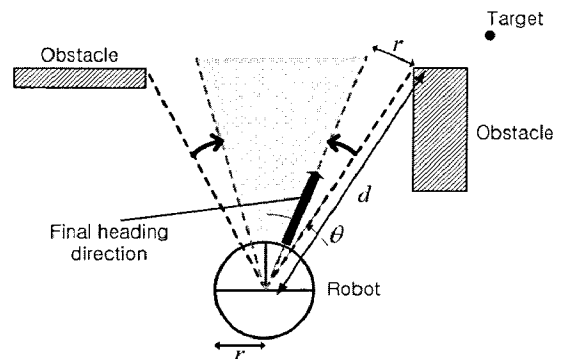


그림 2. 충돌회피를 위한 장애물확장.
Fig. 2. Enlarge the obstacle to avoid collision.

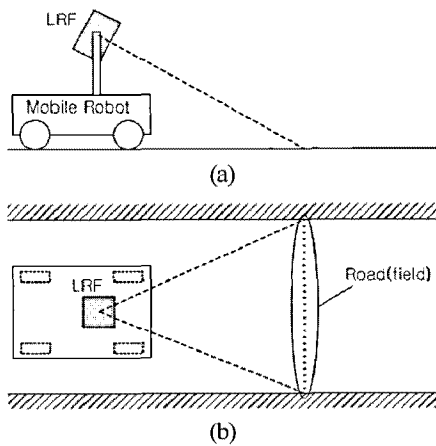


그림 3. 도로표면 검출을 위한 기울어진 레이저센서배치.
Fig. 3. Configuration of the tilted LRF to detect the surface of the road.

평행하게 설치하게 되면 자동차와 같이 비교적 높이가 높은 장애물은 인식할 수 있으나 연석과 같은 높이가 낮은 장애물을 인식할 수 없게 된다. 또한 환경 인식 부분에서 연석과 지표면을 구별하여 주행 가능한 영역을 판별해야 하기 때문에 레이저의 기울임이 필요하다. 따라서 본 연구에서는 단일 거리 측정 센서를 기울임으로써 높이가 낮은 연석 등을 장애물로 인식 하도록 하였으며 지면은 주행 가능 영역으로 인식하는 알고리즘을 구상하였다. 또한 VFH의 야외 사용 시 부족한 점을 보완하였다. 우선 이 알고리즘을 이용하여 단일 거리 측정 센서의 scan면 위에서 단일 거리 측정 센서와 도로 면과의 최소 거리도 도출해낸다. 이 최소 거리 값은 VFH 알고리즘에서의 안전거리 제한 값(threshold)과 관련이 있다. VFH 알고리즘을 사용하여 주행할 경우 threshold 값을 정해야 하는데 단일 거리 측정 센서 scan면 위의 단일 거리 측정 센서와 지면과의 최소거리보다 큰 값을 제한 값으로 정하게 되면, 로봇은 지면을 장애물로 인식하게 된다. 이와 반대로 지면과의 최소 거리보다 작은 값을 제한 값으로 정하게 되면 연석과 같은 높이가 낮은 장애물을 인식할 수 없게 된다.

본 연구에서 개발한 지면 인식 알고리즘은 레이저 센서 데이터들의 연속되는 두 점의 거리와 기울기를 이용하였다. 단일 거리 측정 센서를 기울여서 장착한 모습을 옆에서 보면 그림 3(a)와 같다. 그림에서 점선은 단일 거리 측정 센서의 scan면을 의미하며, 그 면의 일부는 지면과 만나게 된다. 로봇을 위에서 본 그림은 그림 3(b)와 같으며 지면 인식 알

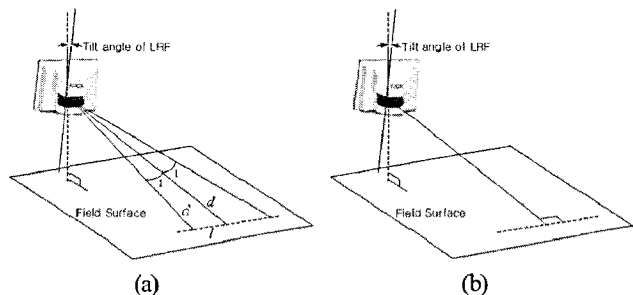


그림 4. 기울어진 레이저센서의 데이터형상.
Fig. 4. Scheme of scanned data by tilting LRF.

고리즘의 목적은 그림에 표시된 지면(road)에 해당하는 레이저 데이터 추출하는 것이다.

그림 4(a)그림을 보면, 단일 거리 측정 센서가 임의의 각도로 기울어져 있으면 도로 면이 완전한 평면일 때 단일 거리 측정 센서의 중심을 기준으로 지면과의 센서 데이터 거리는 대략 d 값을 가지게 된다. 그리고 사용하는 단일 거리 측정 센서의 분해능이 1° 라고 한다면 삼각법에 의해서 l 값을 알 수 있다. d 값이 8m 일 때, l 값은 약 20cm 가 되며, 연속하는 두 점이 지면에 해당하는 점이 되기 위해서는 두 점 사이의 거리가 이 값에 근접해야 한다.

그림 4(b)에서 보면, 도로 면이 완벽한 평면이라면 로봇의 정면과 도로 면과 만나는 레이저 데이터의 묶음과는 수직이 되어야 하며, 그 묶음에 속하는 점들은 일직선위에 존재해야 한다. 실제 도로 면의 경우 비가 왔을 때 빗물이 흘러내려갈 수 있게 도로의 양쪽을 도로의 중앙부분보다 조금 낮게 하기 때문에 실제 데이터는 완벽한 일직선이 될 수는 없다. 하지만, 연속하는 두 점의 기울기는 지면을 추출하기 위한 하나의 중요한 정보가 될 수 있다.

연속하는 두 점의 거리와 기울기 정보를 활용하여 단일 거리 측정 센서를 통해 얻은 실제 데이터를 분석한 결과는 그림 6에 나와 있다.

그림 5(a)는 로봇에 장착된 단일 거리 측정 센서를 2.5° 기울인 상태에서 레이저 데이터를 얻었을 때의 주위 환경을 나타내며, 검은 선으로 표시된 부분이 단일 거리 측정 센서의 scan 면과 지면이 만나는 부분이다. 그림 5(b) 위에 있는 그래프는 실제 레이저 데이터를 나타낸다. 앞에서 언급한 연속한 두 점 사이의 거리와 기울기에 대한 조건을 만족하는 점들만을 추출한 결과는 그림 5(b) 아래의 그래프에 해당한다. 선택된 점들은 연속하는 두 점 사이의 거리가 0.3m 이하이고, 기울기가 40° 이하인 점들을 나타낸다.

레이저 데이터들의 묶음은 크게 로봇의 왼쪽 방향에 위치한 기둥, 연석, 로봇의 정면에 위치한 도로 면이다. 우리는 이 세 묶음 중에 도로에 해당하는 묶음을 추출해야 한다. 그 묶음 추출하기 위한 기준으로 우리는 그림 5(b)에서 추출된 점들의 Y 축 방향의 절편의 평균값을 사용하였으며, 그 평균 값은 그림 5(b) 아래의 그래프에서 직선으로 표시되어 있다. 단일 거리 측정 센서를 사용하여 얻은 데이터들 중에서 지면에 대한 데이터 수가 가장 많기 때문에 선택된 점들의 Y 축 절편의 평균값을 구하게 되면 지면에 해당하는 점들의 Y 축

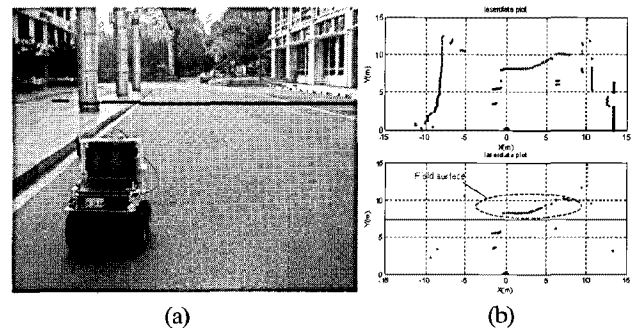


그림 5. 실험환경과 레이저센서데이터.
Fig. 5. Test environment and LRF data plot.

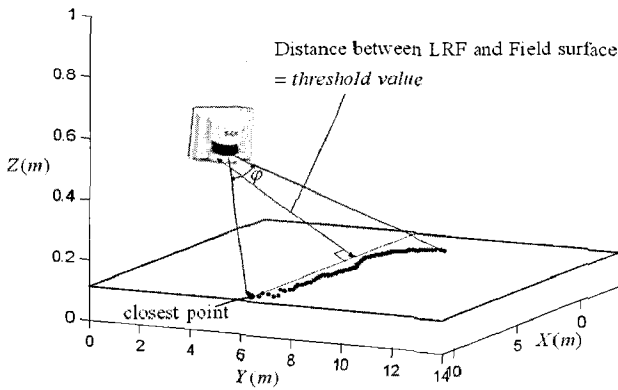


그림 6. 레이저센서와 노면의 거리.
Fig. 6. Distance between LRF and field surface.

절편 값들에 가깝게 된다. 일반적인 야외 환경은 로봇의 좌우에 나무나 자동차, 연석과 같은 기타 장애물이 존재하며, 이 장애물들의 Y축 방향의 거리는 지면보다 가깝게 된다. 그러므로 평균 값보다 큰 Y축 거리 값을 가지는 묶음을 도로 면에 해당하는 점들의 묶음으로 판단할 수 있다.

우리는 도로 면의 묶음에 해당하는 점들 중에서 가장 작은 Y축 값을 지면과의 최소거리로 정하였으며, 그 이유는 다음 그림에 설명되어 있다.

그림 6의 점들은 단일 거리 측정 센서를 기울여 측정한 데이터들 중에서 지면에 해당하는 점들을 나타낸다. 실제 환경에서의 지면은 고르지 않기 때문에 위와 같은 데이터들이 측정된다. 우리는 이 지면에 해당하는 레이저 데이터들 중에서 로봇과 가장 가까운 수직거리를 가지는 점(closest point)의 수직 거리를 지면과의 최소 거리로 간주하였다. 그 이유는 지면이 이 점을 포함하는 완벽한 평면이라고 가정하였기 때문이다. 지면과의 최소 수직 거리 값을 VFH 알고리즘에서 값으로 사용하게 되면, 로봇은 도로 면을 장애물로 인식하지 않고 주행하게 되며, 도로 면보다 가까운 거리에 물체가 나타나게 되면 장애물로 인식하여 회피할 수 있게 된다. 또한, 로봇을 기준으로 지면에 해당하는 영역에 대한 각도 범위(ϕ) 값을 활용하여 로봇이 도로 내에서만 주행하도록 할 수 있다. 다만, 틸팅각이 작아서 고르지 않은 지면에 의해 로봇이 흔들리면서 지표면을 검출하지 못할 경우에는 기준 제한값(threshold)을 사용함으로써 장애물 회피에 이용하였다.

4. 야외 로봇의 주행 제어 기법

야외 로봇의 주행 제어 기법은 크게 기본 VFH 알고리즘과 충돌 회피를 위한 장애물 확장 과정 및 선택된 주행 영역의 로봇 통과 가능성 여부 판명 과정, 그리고 레이저 거리 센서를 이용한 지면 인식 부분으로 구성되어 있다.

VFH 알고리즘에서의 제한 값에 대입할 지면과의 최소 거리 값을 구하는 과정은 다음과 같다. 먼저, 단일 거리 측정 센서를 통해서 얻은 181개의 레이저 데이터들로부터 연속된 두 개의 데이터들의 거리 및 기울기를 계산한다. 계산한 180개의 거리와 기울기 값들에 대한 제한 값을 정하여 그 제한 값보다 작은 값을 가진 점들을 선택한다. 그리고 로봇 중심의 좌표 계를 기준으로 선택된 점들의 y축 값들의 평균값(m)을 계산하고, 그 평균값보다 y축 거리가 더 먼 점들을 추출한다. 그리고 그 추출된 점들 중에 y축 거리가 가장 작은 값

을 지면과의 최소 거리로 선택한다. 이를 요약하면 다음과 같다.

Algorithm 1. Computing minimum distance between LRF and field-surface in LRF scan surface

Input: For $i=1^\circ \sim 181^\circ$, obtain distance value at each angle and derive x_i, y_i

1. Calculate the distance(d) and slope(α) between two consecutive points
2. Select the points which have smaller value than *threshold value* of d and α and calculate the y-axis distance y_i of selected points
3. Calculate mean value(m) : $\frac{\sum_{j=1}^N y_j}{N}$ (N : number of selected points)
4. Select the points which have bigger value than m
5. Calculate the smallest y-axis distance(d_{field}) of selected points

우리가 구상한 최종 주행 제어의 순서는 다음과 같이 이루어진다. 먼저, 단일 거리 측정 센서를 사용해서 180° 범위 내의 1° 단위의 거리 정보를 얻는다. 그리고 그 정보를 바탕으로 지면과의 최소 거리 값(d_{field})을 계산한 후, 그 값을 VFH 알고리즘에서의 제한 값에 대입한다. 제한 값을 바탕으로 로봇이 주행할 수 있는 후보 영역(candidate valley)들을 계산하고, 그 영역들 중에서 목표점을 향하는 방향과 가장 차이가 작은 영역을 선택하여 로봇이 통과할 수 있는 여부를 판단한다. 만약 로봇이 통과할 수 있다면 그 영역을 로봇이 최종적으로 주행하고자 하는 영역으로 선택한다. 로봇이 통과할 수 없다면 후보 영역들 중에서 크기가 가장 큰 영역을 최종적으로 주행하고자 하는 영역으로 선택한다. 선택된 영역에 대해서 로봇이 장애물과 충돌하지 않기 위해 장애물을 가상으로 확장하는 과정을 거친 후 로봇이 최종적으로 가고자 하는 방향을 구한다. 마지막으로 이를 현재 로봇의 방향과 비교하여 로봇에 필요한 w 값을 로봇의 각속도 입력으로 주게 된다.

Algorithm 2. Motion control strategy

Input: For $i=1^\circ \sim 181^\circ$, obtain distance value at each angle and derive x_i, y_i

1. Calculate d_{field} and apply d_{field} as a *threshold distance* of VFH algorithm
2. Calculate candidate valleys in VFH process
3. Select the valley which is closest to the target direction
If robot is possible to pass the selected valley without collision,
Choose the valley as a finally selected valley
else
Choose the widest valley as a finally selected valley
4. Enlarge the obstacle to avoid collision
5. Calculate w by using the final direction to move

로봇의 선속도 V 입력에 대한 식은 다음과 같다.

$$V = V' \cdot \left(1 - \frac{|w|}{\text{maximum rotational velocity}}\right) + V_{\min} \quad (3)$$

$$\begin{cases}
 V' = V_{\max} \\
 V' = V_{\max} \cdot \frac{\text{distance from closest obstacle}}{\text{threshold} / 2}
 \end{cases}$$

(if distance from closest obstacle > threshold / 2)
 (if distance from closest obstacle ≤ threshold / 2) (4)

로봇으로부터 가장 가까운 장애물과의 거리가 제한 값의 절반 (threshold/2) 보다 크다면 선속도 입력은 로봇의 최고 속력이 된다. 반면에 한 값의 절반보다 더 가깝게 존재하면 선속도 입력은 가장 가까운 장애물과의 거리에 비례하게 하여 장애물이 접근할 수록 장애물에 부딪히지 않기 위해 저속으로 주행하게 된다. 그리고 로봇의 선속도가 각속도의 크기에 반비례하게 하여 로봇의 회전 량이 많게 되면 선속도를 줄여서 주行的 안정성을 증가시켰다.

III. 실험 결과

1. 로봇 플랫폼

실제 야외 환경에서 실험을 하기 위한 이동 로봇의 플랫폼은 그림 7에 나와 있다.

본 연구에서 사용한 이동 로봇은 Mobile Robots 사의 야외용 이동 로봇 플랫폼인 P3-AT 모델이다. 길이는 50cm, 폭은 49cm, 높이는 26cm이며, 조향 방식은 skid-steer 방식으로 야외 주행에서 강점을 가지지만, odometry가 differential 방식보다 부정확하다는 단점을 가진다. 구동 가능한 최대 선속도는 1.2m/s, 최대 각속도는 300deg/s이다. 플랫폼에서 사용한 LRF는 SICK사의 LMS-221 모델이며, 이 모델은 야외용으로 제작된 제품으로 heater가 내장되어 있어 영하 30°C 이상의 기온에서 사용 가능하다. DGPS는 Novatel 사에서 출시된 ProPak-V3를 사용하였다. ProPak-V3는 크게 base station과 rover station으로 구성되어 있으며, 고정된 base station의 위치로부터 rover station의 위치를 보다 정확하게 알려 준다.

정확한 로봇의 heading angle을 구하기 위해서 gyro-compass 센서를 사용하였다. 본 연구에서 사용한 센서는 Xsens 사의 MTi 모델로서, roll, pitch, yaw 방향의 절대 각도 값과 각 방향에 대한 각속도 값과 각가속도 값을 제공한다.

로봇의 위치 추정은 odometry 정보와 gyro-compass 센서를

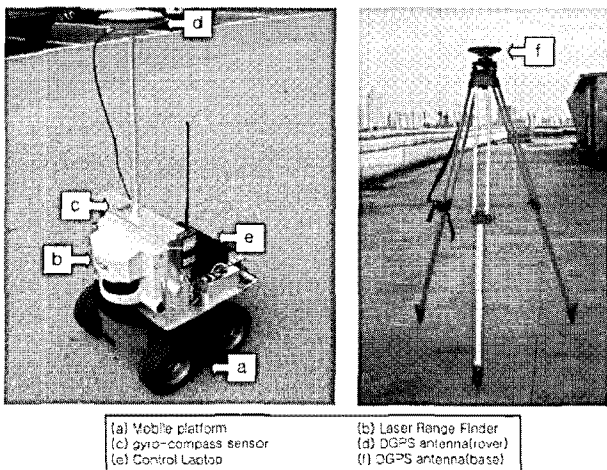


그림 7. 실외로봇플랫폼.
Fig. 7. Outdoor patrol robot platform.

통해서 yaw 방향의 각속도 정보와 DGPS를 통해 얻은 위도와 경도 정보를 활용하여 EKF (Extended Kalman Filter) 알고리즘을 사용하여 로봇의 주행 시 매 순간 로봇의 위치를 계산하였다.

2. 야외 주행 실험

실험은 모교의 자연계 캠퍼스 내에서 이루어 졌으며, 본 실험에 앞서 DGPS 데이터가 비교적 정확한 장소를 선정하기 위한 실험을 하였다. DGPS 시스템의 base station의 경우 지대가 높고 주위에 위성과의 송수신을 방해하는 요소가 적은 장소에 고정시켜야 하기 때문에, 건물의 옥상에 DGPS의 base station을 설치하였다.

그림 8은 ‘구글 어스(google earth)’를 사용하여 찍은 교내의 위성사진이다. 이 환경에서 우리는 실제 실험을 수행할 구간을 찾기 위해, 임의로 DGPS 안테나를 들고 이동하면서 데이터를 수신하였다. 로봇 플랫폼에서 DGPS 안테나의 높이가 1.3m 정도 되는 것을 감안하여, 사람이 직접 안테나의 높이를 대략 1.3m로 유지하면서 교내를 돌아다니던 결과는 점으로 표시되어 있다. 우리는 시작점(start)에서 출발하여 시계 방향으로 교내를 돌아 다시 시작점으로 돌아왔다. 임의의 주행을 통해서 실제 실험을 수행한 구간은 하얀 원으로 표시된 구간이다. 이 구간의 경우 다른 구간에 비해서 위치 정보가 비교적 정확하고 지대가 편평하여 로봇의 주행이 안정적이었기 때문에 실험 장소로 설정하였다.

그림 9는 주행 실험 환경의 상세사진이다. (a)는 로봇의 출발점에서 본 주행 환경이고, (b)는 그 환경에 해당하는 위성 사진이다. 실험은 출발점(start)에서 목표점(goal)까지 주행하는

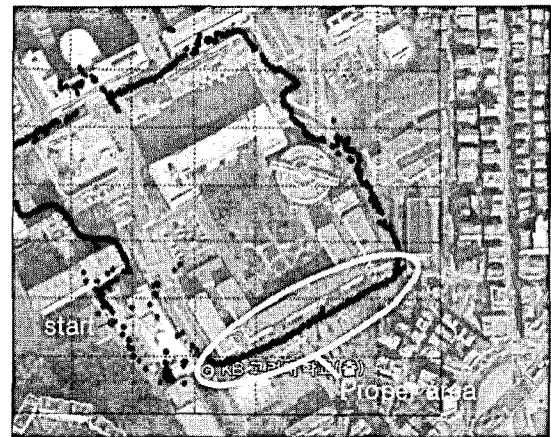


그림 8. DGPS로부터 수신된 위치값.
Fig. 8. DGPS pose data in campus.

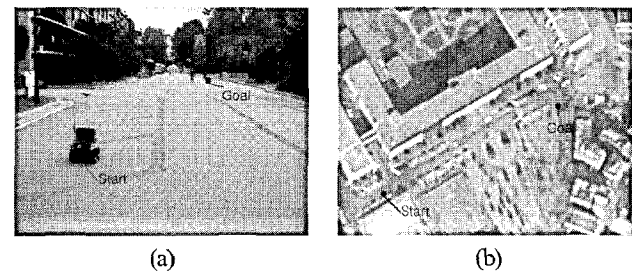


그림 9. 교내실험환경.
Fig. 9. Experiment environment in campus.

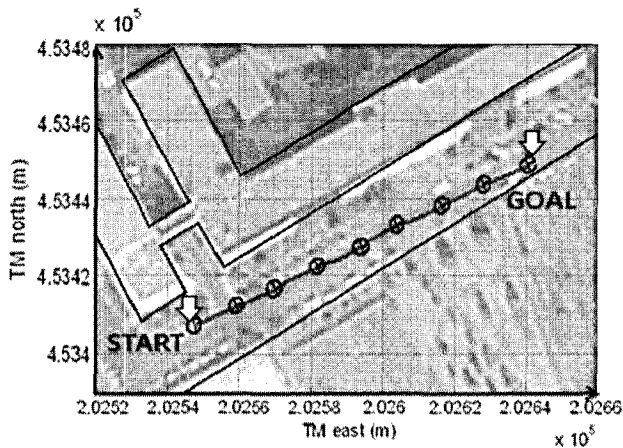


그림 10. 확장칼만필터를 이용한 자세추정결과.
Fig. 10. Pose estimation using EKF algorithm.

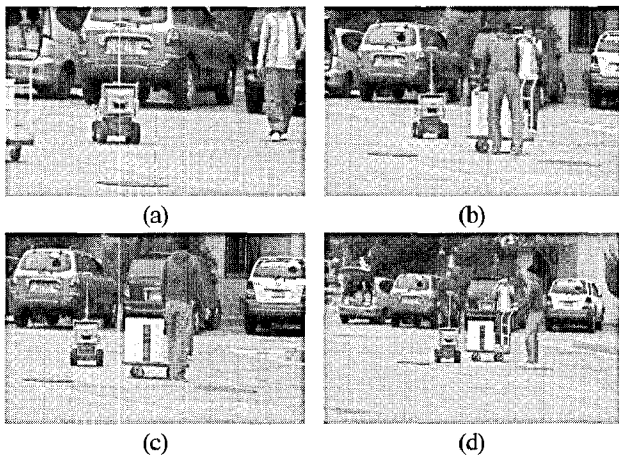


그림 11. 장애물회피과정.
Fig. 11. Obstacle avoidance in campus.

실험이었으며, 위치 추정 및 장애물 회피에 대한 시험에 대한 결과는 다음과 같다.

그림 10은 로봇의 주행 시 EKF 알고리즘을 통해서 로봇이 시작점에서 목표점까지 주행하는 동안 위치 추정을 한 결과이다.

그림 11은 주행 시험 시 장애물 회피 과정을 보여 준다. 로봇이 목표점을 향해 주행하다가(a), 제한 값보다 가까운 거리에 장애물이 로봇의 주행을 가로막게 된다(b). 그리고 로봇이 주행 가능한 영역을 계산한 후(c), 가상의 장애물 확장 과정을 통해서 영역의 크기를 줄이고, 그 영역 내에서 목표점과 가장 차이가 작은 방향으로 주행하게 된다(d). 실험 시 최대 선속도는 0.75m/s이며, 최대 각속도는 30°/s로 정하였다. 위 실험에 대한 자세한 데이터들은 다음 그래프에 나와 있다.

그림 12는 그림 11(b)의 상황에서의 데이터를 의미한다. 왼쪽의 그림은 로봇의 좌표 계에서 단일 거리 측정 센서를 통해 얻은 데이터를 보여준다. 가로로 그려진 실선의 경우 우리의 지면 인식 알고리즘의 Y축 값의 평균을 의미하며, 굵은 점으로 표시된 부분이 실제 지면이라고 인식된 부분이다. 이 지면을 얻기 위한 연속되는 두 점의 제약 조건은 ‘두 점 사이의 거리가 0.3m 이하’, ‘두 점 사이의 기울기가 40° 이하’이며, 지면에 해당하는 점들이 비교적 정확하게 측정됨을 확

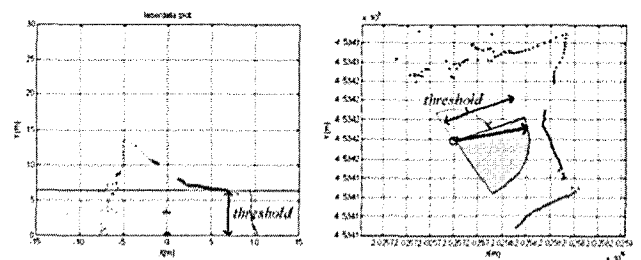


그림 12. 그림 11(b)에서의 레이저센서값과 검출된 지면.
Fig. 12. Field detection and motion of robot of Fig. 11(b).

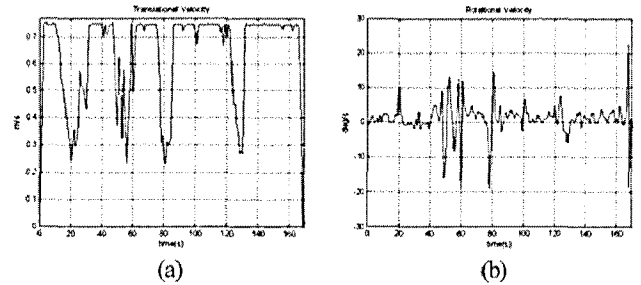


그림 13. 주행중 로봇의 병진속도와 회전각속도.
Fig. 13. Translational and rotational velocity.

인할 수 있다. 그리고 최종적으로 지면과의 최소 거리인 제한 값을 주행 제어 알고리즘에 대입한 결과는 오른쪽 그림에 해당한다. 로봇을 중심으로 제한 값보다 멀리 떨어진 영역을 주행 가능한 영역으로 분류하여, 그 영역 내에서 로봇이 장애물과 부딪히지 않게 하기 위해 가상으로 장애물을 확장한다. 최종적으로 로봇이 주행 가능하다고 판단하는 영역(회색으로 표시)내에서 목표점을 향하는 방향과의 차이가 가장 작은 방향(화살표 표시)으로 주행하게 된다. 오른쪽 그림에서 로봇을 중심으로 한 반원은 로봇으로부터 거리가 제한 값의 절반 (threshold/2)인 영역을 의미한다. 로봇으로부터 가장 가까운 장애물과의 거리가 이 영역 밖에 존재하면 로봇은 최대 선속도로 주행하게 되며, 이 영역 안에 존재하면 로봇의 선속도는 가장 가까운 장애물과의 거리에 반비례하게 된다. 주행 시 로봇의 선속도와 각속도는 그림 13에 나타나 있다.

로봇의 주행 성능은 로봇의 주행 속도와 안정성에 의해 평가된다. 따라서 동일한 구간에서의 실험을 3회 반복함으로써 주행 성능을 정리하였다. 3회 반복시험에서 평균적으로 한 회 주행 당 그림 11에서와 같은 장애물 회피가 3회 이루어졌다. 모든 주행에서 장애물과의 충돌은 발생하지 않았으며 로봇의 평균 주행 속도는 최대 주행가능 속도(750mm/s)와 장애물 회피 횟수를 고려하였을 때, 610mm/s로써 우수한 속도 성능을 보였다.

IV. 결론

본 논문은 준 구조화된 도로 환경을 주행하면서 순찰 및 감시 기능을 하는 야외 로봇의 개발을 목적으로 하였으며 자율주행에 대한 제어 기법을 제안하였다. 주행 제어 알고리즘으로는 동적인 실외 환경에 적용이 용이한 VFH을 사용하였다. 가상으로 장애물을 확장하는 방법과 주행 가능한 영역에서 로봇의 통과 여부를 확인하는 과정을 추가하여 장애물과 충돌 없이 효율적인 자율주행을 가능케 하였다. 또한 단일

거리 측정 센서를 이용하여 장애물 회피 및 지표면추출로 인한 주행 가능영역 파악에 이용하였다. 실외 환경은 평탄하지 않기 때문에 장애물과 지표면을 구별하기 위해서는 매 순간 지표면에 대한 인식이 이루어져야 한다. 이번 논문을 통해 실외 환경에서 제안된 자율주행 제어기법을 통한 로봇의 주행성능을 확인하였다.

참고문헌

[1] J. Borenstein and Y. Koren, "The vector field histogram - fast obstacle avoidance for mobile robots" *IEEE Journal of Robotics and Automation*, vol. 7, no. 3, pp. 278-288, June 1991.

[2] R. B. Tilove, Local obstacle avoidance for mobile robots based on the method of artificial potentials, *IEEE Int. Conf. Robot. Autom.* pp. 566-571, 1990.

[3] D. Fox, W. Burgard, and S. Thrun, "The dynamic window approach to collision avoidance," *Robotics & Automation Magazine, IEEE*, vol. 4, Issue 1, pp. 23-33, Mar. 1997.

[4] Y. Kanayama, Y. Kimura, F. Miyazaki, and T. Noguchi, "A stable tracking control method for a non-holonomic mobile robot," *Intelligent Robots and Systems '91. Intelligence for Mechanical Systems, Proceedings IROS '91. IEEE/RSJ International Workshop*, vol. 3. on. 3-5, pp. 1236-1241, Nov. 1991.

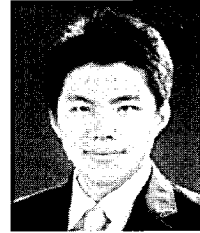
[5] K. Konolige, "A gradient method for realtime robot control," in *Proceedings of the IEEE/RSJ Conference on Intelligent Robots and Systems*, Takamatsu, Japan, 2000.

[6] 노치원, 김승훈, 김문준, 강성철, 홍석교, "DGPS와 연석 추출을 이용한 순찰용 로봇의 개발" 제어 · 자동화 · 시스템공학 논문지, 제13권 제2호, pp. 140-146, 2007.

[7] Morales Yoichi, Carballo Alexander, Takeuchi Eijiro, Aburadani Atsushi, and Tsubouchi Takashi, "Autonomous robot navigation in outdoor cluttered pedestrian walkways," *Journal of Field Robotics*, vol. 26, pp. 609-635, 2009.

[8] W. S. Wijesoma, K. R. S. Kodagoda, and A. P. Balasuriya, "Road-boundary detection and tracking using lidar sensing," *IEEE Trans. Robot. Automat.* vol. 20, pp. 456-464, June 2004.

[9] Y. Chunhe and Z. Danping, "Road curbs detection based on laser radar," *Proceedings of IEEE International Conference on Signal Processing (ICSP'06)*, China. 2006.



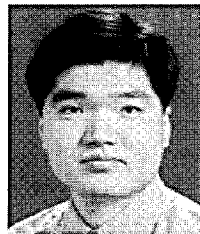
홍 승 범

2007년 고려대 기계공학과 졸업. 2009년 고려대 기계공학과 석사. 2009년~현재 아이너스 테크놀로지에서 근무. 관심분야는 이동로봇의 실외 자율주행 및 주행제어.



신 유 진

2008년 고려대 기계공학과 졸업. 2010년 고려대 기계공학과 석사. 2010년 현재 현대 모비스 연구 개발에 근무. 관심분야는 실외 환경 인식 및 위치 추정, 경비로봇.



정 우 진

1993년 서울대 기계설계학과 졸업. 1995년 동경대 기계정보공학과 석사. 1998년 동 대학원 박사. 1998년~2005년 KIST 선임연구원. 2005년~현재 고려대학교 기계공학과 부교수. 관심분야는 이동로봇 위치추정 및 주행제어, 논홀로노믹 시

스템 제어.