

논문 2012-49SC-1-9

Heave 추정 기반의 레이저 거리측정기를 이용한 선행지형예측시스템

(Land Preview System Using Laser Range Finder based on Heave Estimation)

김 태 원*, 김 진 형**, 김 성 수***, 고 윤 호****

(Tae Won Kim, Jin Hyoung Kim, Sung Soo Kim, and Yun Ho Ko)

요 약

본 논문에서는 heave 추정 알고리즘 기반의 레이저 거리측정기를 이용한 새로운 선행지형예측시스템을 제안하였다. 본 논문에서 제안하는 선행지형예측시스템은 자율주행 차량이 앞으로 주행할 지면의 형상 정보를 얻기 위한 시스템이다. 이러한 선행지형예측시스템을 구현하기 위하여 측정 범위가 넓고 다양한 환경 조건에서 강인한 레이저 거리 측정기가 일반적으로 이용된다. 이 때 전방 지형을 생성하기 위해 차량의 현재 위치를 알아야 하는데 기존 선행지형예측시스템에서는 heave 움직임을 측정하기 위해 IMU나 가속도계와 같은 가속도 기반 센서들이 주로 이용된다. 하지만 이들 센서는 이동 로봇과 같은 저비용 차량에 사용하기에 고가이며 급 가속이 발생하는 모바일 로봇에서 측정 오차가 증가하는 문제를 가진다. 이러한 문제를 극복하기 위해 본 논문에서는 주행계와 이전 측정된 지형 정보를 이용한 heave 추정 알고리즘을 제안하였다. 시뮬레이터와 실제 시스템을 이용한 다양한 지형에서 실험을 수행하고 그 결과를 확인해 봄으로써 제안된 heave 추정 알고리즘에 기반한 선행지형예측시스템을 검증하였다.

Abstract

In this paper, a new land preview system using laser range finder based on heave estimation algorithm is proposed. The proposed land preview system is an equipment which measures the shape of forward topography for autonomous vehicle. To implement this land preview system, the laser range finder is generally used because of its wide measuring range and robustness under various environmental condition. Then the current location of the vehicle has to be known to generate the shape of forward topography and sensors based on acceleration such as IMU and accelerometer are generally utilized to measure heave motion in the conventional land preview system. However the drawback to these sensors is that they are too expensive for low-cost vehicle such as mobile robot and their measurement error is increased for mobile robot with abrupt acceleration. In order to overcome this drawback, an algorithm that estimates heave motion using the information of odometer and previously measured topography is proposed in this paper. The proposed land preview system based on the heave estimation algorithm is verified through simulation and experiments for various terrain using a simulator and a real system.

Keywords : LRF, land preview system, heave measurement, mobile robot, localization.

* 정회원, 한국원자력연구원

(Korea Atomic Energy Research Institute)

** 학생회원, *** 정회원, **** 평생회원-교신저자, 충남대학교 메카트로닉스공학과

(Department of Mechatronics Engineering, Chungnam National University)

※ 이 논문은 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것임(2011-0013923)

접수일자: 2011년7월6일, 수정완료일: 2011년12월19일

I. 서 론

미 국방고등연구계획국의 무인자동차 경주대회 (DA RPA Grand Challenge)를 계기로 자율주행차량에 관한 연구가 급속히 진행되고 있다. 대회가 처음 개최된 2004년에는 한 팀도 완주하지 못했지만 이듬해인 2005년에는 다섯 팀이 완주하였다. 또한 2007년에는 사막의

무인도로를 벗어나 교통신호와 규칙이 있는 가상의 도시에서 대회가 개최될 정도로 자율주행 차량 기술이 급속히 발전되고 있는 것을 알 수 있다.

이러한 자율주행차량 및 로봇을 개발할 때 생각해야 하는 가장 큰 문제는 주행 시 장애물을 어떻게 피하고 이동 경로를 어떻게 생성해야 할 것인가 하는 문제이다. 장애물 회피 및 최적 경로 생성이 제대로 되지 않는다면 로봇 시스템 자체의 완성도가 크게 떨어질 뿐만 아니라 로봇이 장애물에 부딪치거나 자신이 주행할 수 없는 지형을 주행하려 하는 등의 문제가 생기게 된다. 이러한 문제를 해결하기 위해서 각종 센서를 이용하여 로봇이 주행할 선행 지형의 정보를 미리 획득하고 판단하는 것이 매우 중요하다. 이렇게 선행 지형 정보를 획득하는 시스템을 칭하는 용어는 여러 가지가 있겠으나 본 논문에서는 선행 지형정보를 획득 하는 것을 지형예측이라 하고 지형예측을 가능하게 하는 센서 및 소프트웨어 시스템을 통틀어 지형예측시스템이라 정의한다.

지형예측시스템은 모바일 로봇의 크기와 동작 환경에 따라 다양한 종류의 거리측정 센서를 이용하여 구축한다. 이러한 거리측정 센서는 적외선 방식, 초음파 방식, 레이저 방식 등이 있는데 최근의 연구는 주로 레이저 거리측정기를 이용하는 것이 대부분이다.

레이저 거리측정기(Laser rangefinder : LRF)란 레이저 광선이 물체에 반사되어 돌아올 때 까지 걸리는 시간을 이용하여 거리를 측정하는 센서이다. 특히 방사형 레이저 거리측정기를 사용할 경우 점 측정 방식의 레이저 거리측정기와는 달리 방사형으로 뻗어나가는 여러 가닥의 레이저 광선을 이용하여 다수의 지점을 한 번의 스캔으로 측정할 수 있는 장점이 있다.^[1] 이러한 레이저 거리측정기는 적외선, 초음파 방식에 비하여 측정할 수 있는 거리도 길고 주변광의 영향에도 자유롭다. 또, 직진하는 레이저의 성질상 초음파나 적외선 센서에 비해 신뢰할 수 있는 방향 정보도 제공한다.

레이저 거리측정기를 이용한 기존 연구는 다음과 같다. 스탠포드 대학의 자율주행차량 Stanley는 레이저 거리측정 데이터를 PTA라 불리는 확률적 지형 해석을 하여 주행 경로 생성 문제를 해결하였다.^[2] 스위스의 SmartTer는 모바일 로봇에 다섯 대의 레이저 거리측정기를 설치하여 전방위 3d mapping을 수행한다.^[3] 또한 점군 기반의 지형정보를 입방형 격자 기반으로 대신함으로써 정보의 양을 줄이는 연구와 점군 데이터에서 구조물의 윤곽선을 추출하는 연구, 레이저 거리측정기와

스테레오 카메라를 퓨전 하여 측정 된 3차원 형상의 품질을 높이는 연구 등이 있다.^[4-6] 이렇듯 최근의 연구 동향을 살펴보면 모바일 로봇의 자율주행을 위한 3차원 공간정보 수집과 획득한 정보의 2차 가공에 관한 연구가 활발히 진행되고 있음을 확인할 수 있다.^[7-8]

일반적으로 자율주행을 위한 지형예측시스템은 로봇에 센서가 부착된 형태로, 로봇이 주행함에 따라 주변 지형을 측정하는 방식이다.^[2, 9-12] 따라서 센서의 기준위치가 항상 변하게 되며 이를 localization 하는 것이 매우 중요하다. 이를 위해 베이스 로봇에 localization을 위한 센서들이 추가로 장착되는데 엔코더, GPS, IMU(inertial measurement unit) 같은 것들이다. 이 중 로봇의 roll, pitch, yaw 각을 측정하기 위해 사용하는 IMU의 경우 가격이 비싸고 가속상황에서 발생한 에러가 누적되는 등의 문제가 있어 잦은 가속과 감속을 반복하는 모바일 로봇에 사용하기에 적합하다고 볼 수 없다. 따라서 본 논문에서는 이러한 IMU 및 가속도 센서를 사용하지 않고 엔코더와 2축 기울기 센서 그리고 선행지형정보를 보간 하여 로봇의 현재 Z축 변위를 획득하는 heave 추정 알고리즘을 이용한 지형예측시스템을 제안하였다. 따라서 제안된 방식은 레이저거리측정기를 통한 선행지형정보의 추정 및 보간 방식에 따라 heave 추정 성능이 의존하게 된다는 문제점이 있다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 제 II장에서는 지형예측시스템의 구성과 지형좌표복원 방법에 대한 이론적인 부분을 다루고 제 III장에서는 heave 추정 알고리즘과 시스템 구현에 관한 내용을 다룬다. 제 IV장에서는 시뮬레이터와 실제 시스템을 이용한 실험 결과를 통해 제안된 heave 추정 알고리즘의 성능을 검증 하였고 마지막 장에 결론을 정리하였다.

II. 지형예측시스템

본 장에서는 방사형 레이저 거리측정기와 모바일 로봇이 결합되는 보편적인 형태의 지형예측시스템을 설계하고 기구학적 해석 방법을 사용하여 IMU 및 가속도 센서를 사용하지 않고 지형을 복원하는 방법에 대하여 논한다.

1. 시스템 구성

지형예측시스템은 그림 1과 같이 4륜 차량 형태의 모바일 로봇 상단에 레이저 거리측정기가 설치되어 로봇

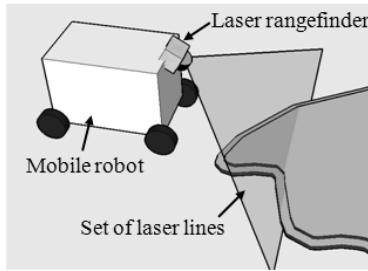


그림 1. 지형예측시스템 개념 설계
Fig. 1. Conceptual design of land preview system.

의 전방 지형을 측정하는 형태로 구성하였다. 이는 지형예측을 위한 가장 기본적인 형태로, 모바일 로봇이 주행함에 따라 연속적인 지형의 형상을 얻을 수 있다.

2. 지형좌표 복원방법

모바일 로봇에 장착된 센서들을 통해 로봇의 3축 변위와 방향각을 획득, 즉 localization을 하였다. 레이저 거리측정 데이터를 이용하여 로봇의 위치와 자세변화를 보상하며 선행 지형좌표를 얻어내는 방법은 기구학적 해석 방법을 이용할 수 있다. 레이저의 특성상 각각의 레이저 라인은 직진하며 물체에 반사되어 시작지점으로 되돌아온다. 이러한 레이저 라인들을 모아 보면 그림 2와 같이 레이저 거리측정기를 꼭지 점으로 하는 부채꼴 모양의 평면을 그리게 된다. 이러한 평면은 레이저 거리측정기의 설치 위치 즉 그림 2의 LRF 좌표계(coordination)에 종속되어 움직이게 되며 이는 센서의 localization을 통해서 전역 좌표계(global coordination)를 기준으로 정의할 수 있다. 이후 레이저 라인들이 이루는 평면의 끝 변, 즉 시작점과 반대되는 위치에 있는 변의 모양을 각각의 레이저 라인들의 길이를 통해 얻어내면 전역 좌표축을 기준으로 각각의 측정지

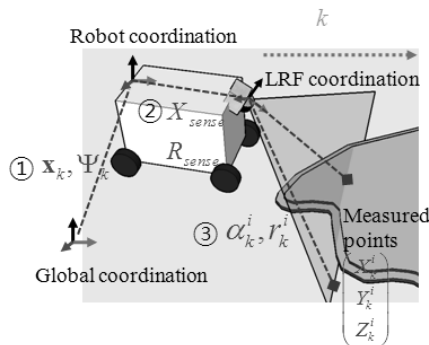


그림 2. 해석을 위한 매개변수 및 좌표축
Fig. 2. Parameter and coordinate axis for analysis.

점좌표를 복원할 수 있다.

전역 좌표축에서 로봇 좌표계(robot coordination)까지의 변환, 즉 모바일 로봇의 localization은 엔코더, 기울기 센서, heave 추정 알고리즘을 통해 이루어질 수 있으며 그 값은 식 (1)의 3축 변위와 오일러 각 벡터로 나타낼 수 있다.

$$X_k = \begin{pmatrix} x_k \\ y_k \\ z_k \end{pmatrix} \quad \Psi_k = \begin{pmatrix} \phi_k \\ \theta_k \\ \psi_k \end{pmatrix} \quad (1)$$

이 때, X_k 는 k 시간에서의 로봇 좌표계의 3축 변위를 나타내는 벡터이며 Ψ_k 는 로봇 좌표계의 3축 오일러 각을 나타내는 벡터로 식 (2)에서 회전행렬 R_k 에 사용된다. 이때의 회전행렬 R_k 와 X_k 는 그림 2의 첫 번째 변환, 전역 좌표계에서 로봇 좌표계로의 변환을 뜻한다. 식 (2)는 그림 2의 전역 좌표계에서부터 로봇 좌표계, LRF 좌표계로의 변환을 거쳐 측정 지점(measured points)들의 좌표를 얻어내는 수식이다^[2].

$$\begin{pmatrix} X_k^i \\ Y_k^i \\ Z_k^i \end{pmatrix} = r_k^i R_k R_{sens} \begin{pmatrix} \cos \alpha_k^i \\ \sin \alpha_k^i \\ 0 \end{pmatrix} + X_k + R_k X_{sens} \quad (2)$$

이 때, X_{sens} 와 R_{sens} 는 로봇의 지역좌표축에서 센서의 설치 변위와 오일러 각을 나타낸다. 이는 즉 로봇 좌표계에서 LRF 좌표계로의 변환 행렬을 뜻한다. α_k^i 는 레이저 거리측정기에서 i 번째 방사각 방향으로 조사되는 레이저 광선의 k 시간에서의 각을 나타낸다. r_k^i 는 이 때 측정된 거리를 뜻한다. 따라서 마지막 변환인 LRF 좌표계에서 각각의 측정 지점들로의 변환을 수행할 수 있다. 이 때, 앞서의 변환과 달리 3축 변위와 오일러 각 벡터가 주어지지 않는 이유 즉 회전 행렬과 이동행렬을 이용하지 않는 이유는 앞서 설명한 바와 같이 LRF 좌표계에 레이저 라인들이 이루는 평면이 종속되어 있기 때문이다. 이와 같이 측정 지점들은 기구학적 해석을 통해 전역좌표축을 기준으로 변환되며 변환된 측정 지점의 좌표 벡터는 $(X_k^i, Y_k^i, Z_k^i)^T$ 로 표시할 수 있다.

III. 지형예측시스템 구현

1. 시뮬레이터 개발

제 II장에서 설명된 지형예측시스템을 기반으로 하는 실제 지형예측시스템을 구현하기 위해 먼저 시뮬레이터를 개발하였다. 시뮬레이터 개발의 목적은 지형좌표복원 공식과 heave 추정 알고리즘의 개발, 그리고 그것들을 다양한 실험지형에서 검증해보기 위함이다. 시뮬레이터는 3차원 그래픽을 이용한 소프트웨어로 개발되었으며 레이저 거리측정기의 설치 위치, 모바일 로봇의 크기, 속도를 반영하여 지형을 복원하고 그때의 센서 데이터 획득 과정을 시각적으로 표현하는 기능을 가진다.

가. 시뮬레이터 구성

시뮬레이터의 전체적인 구성과 기능은 그림 3과 같이 크게 세 가지로 나누어질 수 있다. 우선 실험 지형, 모바일 로봇, 레이저 거리측정기 등을 모델링하는 모델 클래스, 생성된 모바일 로봇 모델을 실험 지형에서 주행시키며 그 때의 레이저 거리측정 데이터, 모바일 로봇의 변위와 자세 데이터를 얻는 시뮬레이션 클래스가 있으며 이렇게 수집한 데이터를 바탕으로 지형좌표를 복원하고 화면에 도시하는 해석 클래스가 있다.

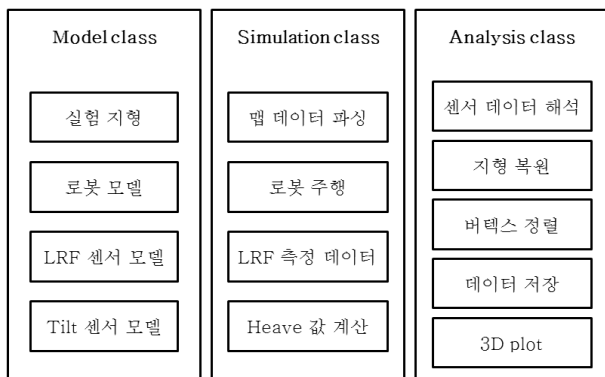


그림 3. 시뮬레이터 블록 다이어그램
Fig. 3. Simulator block diagram.

나. 시뮬레이터 세부 요소 구현

(1) 실험 지형

시뮬레이션의 실험지형은 높이 맵을 이용하여 구현된다. 높이 맵이란 이미지 픽셀의 위치를 X, Y좌표로, 이미지 픽셀의 화소 값을 Z좌표로 하여 맵을 저장하는 방식으로 화소의 밝기와 위치가 3D 상에서의 각각의 버텍스가 되므로 편리하게 지형을 구현할 수 있다. 높이 맵은 그림 4와 같이 표현된다.

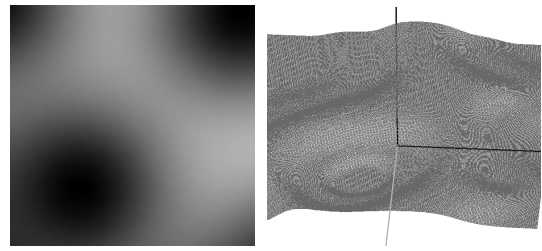


그림 4. 높이 맵 및 높이 맵의 3차원 형상
Fig. 4. Height map and 3d-shape of height map.

(2) 모바일 로봇

모바일 로봇의 경우 4륜 차량을 모델로 하여 가로, 세로, 높이를 매개변수로 가지는 육면체로 구현 하였다. 지면과 접하는 육면체의 네 모서리가 주행 로봇의 바퀴가 된다. 로봇의 바퀴가 실험 지형의 표면 위를 주행하면서 자신의 이동 변위와 방향각을 반환한다. 또한 매 시뮬레이션 샘플링 타임 당 이동거리를 다르게 하여 로봇의 속도 변화를 줄 수 있다.

(3) LRF 센서

레이저 거리측정기는 방사형으로 레이저 광선을 조사하여 물체나 지면에 레이저가 반사되어 돌아올 때까지 걸리는 시간을 통해 거리를 구한다. 레이저의 특성상 각각의 광선은 방사각별로 직진하게 되는데 이를 시뮬레이터 상에서는 그림 5와 같이 모델링 할 수 있다.

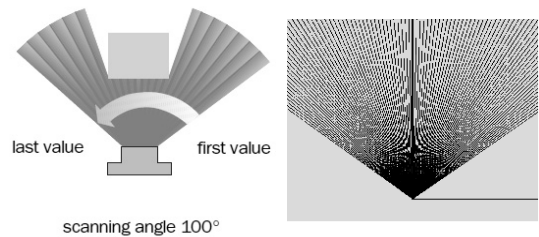


그림 5. 레이저 거리측정기 3차원 형상
Fig. 5. 3D-shape of LRF(Laser Range Finder).

(4) 주행 및 센서 값 획득

위에서 구현한 모바일 로봇 모델과 LRF 센서 모델을 결합하면 그림 6과 같이 모바일 로봇 모델을 완성할 수 있다.

위의 모바일 로봇 모델과 실험지형 모델을 이용하여 레이저 센서의 측정 데이터를 얻어내는 방법은 그림 7과 같이 각각의 레이저 라인이 시작되는 좌표와 실험지형의 메쉬와 교차하는 좌표간의 유클리디안 거리를 구

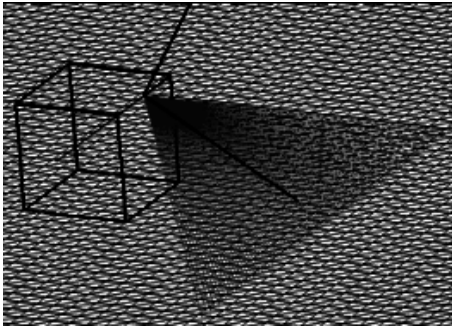


그림 6. 모바일 로봇 모델
Fig. 6. Mobile robot model.

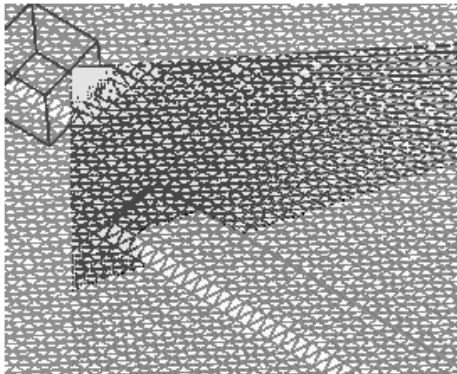


그림 7. 레이저 라인 교차점
Fig. 7. Cross points of laser lines.

하는 것이다.

(5) 해석 결과 plot

위에서 얻은 거리측정 데이터 즉 레이저 센서의 시물레이션 획득 값을 제 II장에서 기구학적 방법으로 해석하여 그 결과를 그림 8과 같이 3D 그래픽을 이용하여 plot 하였다. 이 때, 높이 값에 따른 색상 구분, pan, tilt, zoom 기능을 첨가하여 결과 형상을 다각도에서 확인 할 수 있게 하였다. 또, 실험 지형을 겹쳐 도시함으

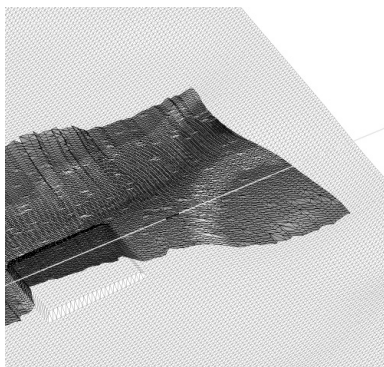


그림 8. 결과 값 plot
Fig. 8. Result plot.

로써 결과 값의 검증을 수행 할 수 있다.

2. Heave 추정 알고리즘

모바일 로봇의 heave 값을 측정하기 위해 가속도 센서 및 자이로 센서를 사용하지 않고 주행계(odometer)와 레이저 거리측정기를 통해 획득한 선행지형 정보를 보간 하여 heave 값을 구하는 방법을 제안하고 이를 시뮬레이터를 통해 구현하였다.

가. 다변량 보간법

로봇의 현재 heave 값을 얻기 위해서는 다변량 데이터 해석을 수행해야 한다. 다변량 데이터 해석이란 하나의 개체에 대해서 여러 변수가 존재하는 다변량 데이터들의 연관관계를 구하는 것을 말하는데 선행지형 정보는 하나의 측정지점에 대해서 세 개의 변수가 주어지므로 다변량 데이터이며 이를 보간 하여 heave 값을 얻어내는 과정은 다변량 데이터들의 연관관계를 해석하는 일이므로 다변량 데이터 해석이라고 할 수 있다. 따라서 제안한 heave 추정 알고리즘은 임의의 네 점을 이용하여 보간 다항식을 만들어내는 다변량 보간법을 사용하였다.^[13] 이러한 임의의 네 점을 이용하는 다변량 보간법은 결국 $P_i(x_i, y_i)$ $i = 0, 1, 2, 3$ 가 주어졌다고 할 때, 이 점들을 지나고 x와 y에 관하여 각각 1차이며 조건 $P_i(x_i, y_i) = f(x_i, y_i)$ $i = 0, 1, 2, 3$ 를 만족하는 보간 다항식을 구하는 것을 말하는데 이러한 다항식은 식 (3)의 형태로 정의하였다.

$$f(x, y) = a + bx + cy + dxy \tag{3}$$

이 때, x_i 의 경우 해당 좌표 점의 X축 좌표 값이고 y_i 의 경우 해당 좌표 점의 Y축 좌표 값이다. $P_i(x_i, y_i)$ $i = 0, 1, 2, 3$ 의 값은 x_i, y_i 지점의 Z축 좌표 값이다.

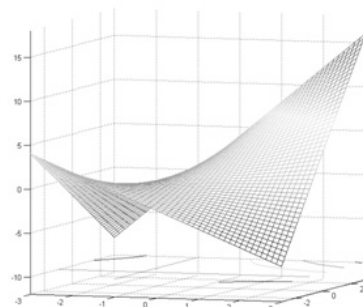


그림 9. 보간 다항식 평면 형상
Fig. 9. Shape of interpolation equation plane.

이러한 보간 다항식이 나타내는 함수의 한 가지 형태는 아래의 그림 9와 같다. 주어진 임의의 네 점이 모두 상이하고 어느 세 점도 동일 직선상에 있지 아니하면 계수 a, b, c, d 를 구하여 보간 다항식을 완성시킬 수 있다.

나. 임의의 4점 선택 방법

다변량 보간법에서 임의의 네 점을 선택하는 가장 좋은 방법은 보간을 원하는 점 주변에 장방형으로 분포하는 점들을 얻는 것이다. 따라서 그림 10과 같이 보간을 원하는 지점을 기준으로 사분면을 설정하고 각각의 사분면에서 유클리디안 거리 값이 가장 작은 점을 네 개 선택하여 보간 다항식의 계수를 구하였다.

이와 같이 같은 직선상에 있지 않은 임의의 네 점을 구하면 다항식 $f(x, y)$ 를 통해 원하는 지점인 (x_d, y_d) 의 Z축 좌표를 구할 수 있다.

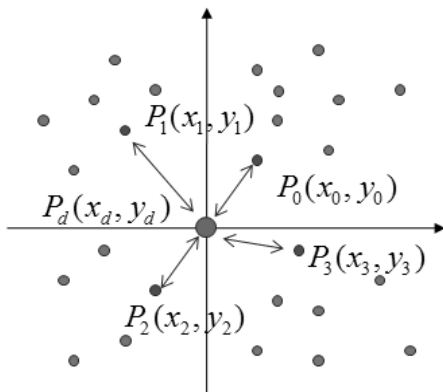


그림 10. 점 선택 방법
Fig. 10. Points selection method.

3. 실제 시스템 구현

4륜 모바일 로봇에 레이저 거리측정기를 설치하여 실제 지형예측시스템을 구현하였다. 레이저 거리측정기의 경우 보편적으로 많이 쓰이고 있는 SICK社의 레이저 거리측정기를 사용하였다. 또한 로봇을 컨트롤 하는 부분과 센서 데이터를 받아 지형좌표를 복원하고 이를 가시화하는 기능을 가지는 해석 소프트웨어를 개발하였고 heave 추정 알고리즘을 적용하였다.

가. 모바일 로봇

차체에는 localization을 위해 레이저 거리측정기외에 2축 기울기 센서, 엔코더, 포텐셜미터가 설치되었으며 센서 데이터 처리 및 무선 통신을 위하여 MCU와 2채

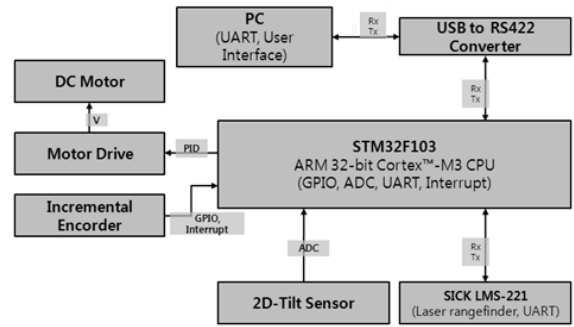


그림 11. 지형예측시스템 구성도
Fig. 11. Land preview system block diagram.

널의 블루투스 모듈을 설치하였다. 엔코더의 경우 구동 축 모터와 조향 축 모터에 장착되어 각각 이동거리와 조향 각을 반환하게 되고 이것을 해석하여 로봇의 localization 즉 X, Y축 변위와 yaw 각을 구하게 된다. 기울기 센서는 지면을 기준으로 로봇의 roll, pitch 발생 상황에서의 각도를 반환한다. MCU는 이러한 센서 데이터를 수집하여 PC로 전송하는 역할과 구동 축 모터와 조향 축 모터를 제어하는 역할을 한다. 이후 PC에서 획득한 센서 데이터를 이용하여 지형 좌표를 복원한다. 그림 11은 하드웨어 블록 다이어그램이다. 그림 12는 완성된 모바일 로봇의 모습이다.

나. 해석 소프트웨어

지형 복원 소프트웨어는 기본적으로 시뮬레이터와 동일한 구조로 동작한다. 다만 로봇을 수동 컨트롤 하기 위한 인터페이스 부분, 레이저 거리측정기를 사용할 때 에러 값을 처리하기 위한 부분, 최종 예측된 지형 형상의 표시를 위한 사용자 편의기능 등에 약간의 차이가 있다.



그림 12. 모바일 로봇
Fig. 12. Mobile robot.

다. LRF 센서 에러 값 처리

레이저 거리측정기의 경우 반사되어 돌아오는 레이저를 검출하여 거리를 측정하는 것이기 때문에 레이저를 흡수하는 검은색 물체나 반사를 일으키는 유리나 거울, 물웅덩이 같은 경우 되돌아오는 빛의 강도가 약해 에러를 일으키게 된다. 이러한 에러의 경우 특정한 규칙이 없고 간헐적으로 발생하는 임펄스 성 에러가 된다. 따라서 매 시간 들어오는 거리측정 데이터를 확인하여 시스템 상 나올 수 없는 큰 값을 보이는 경우 에러라고 판단하여 해당 값을 최근접 이웃 값으로 대체하는 방법을 사용하여 처리하였다. 그림 13은 레이저 거리측정기의 반사율 별 측정 거리를 나타낸다.

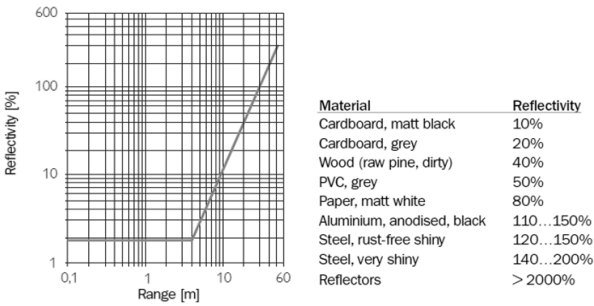


그림 13. 반사율과 측정 범위 관계
Fig. 13. Relation between reflectivity and range.

IV. 실험

가. 시뮬레이터 실험 결과

시뮬레이터를 이용하여 다양한 실험을 수행하고 그 결과를 확인해 보았다. 그림 14는 실험에 사용한 시뮬레이터의 전체적인 모습이다. 왼쪽 창이 실험 지형을 주행하는 로봇의 모습이고 오른쪽 창이 측정된 결과 값을 형상화한 것이다.

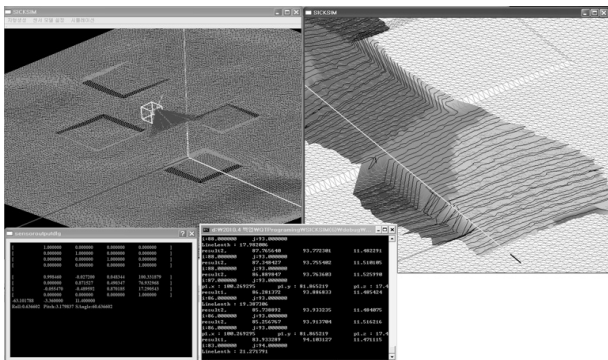


그림 14. 시뮬레이터
Fig. 14. Simulator.

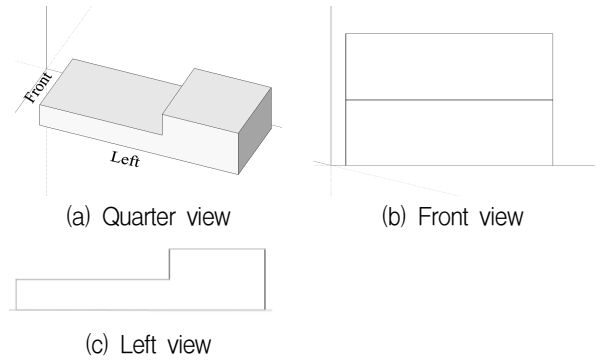


그림 15. 카메라 뷰 정의
Fig. 15. Definition of camera view.

실험 결과를 설명하기에 앞서 이후의 실험결과를 설명하기 위한 각종 시점을 그림 15와 같이 정의한다.

(1) 실험 지형

그림 16은 실험 지형으로 사용된 높이 맵이다. 각각의 맵은 한가지씩의 지형요소를 가지고 있다. 첫 번째는 평지, 두 번째는 오르막, 세 번째는 내리막, 네 번째는 언덕, 다섯 번째는 골짜기 지형이다.

그림 17은 각각의 지형요소들이 복합적으로 포함되어 있는 실험 지형이다.

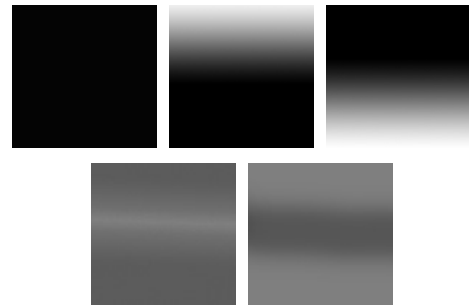


그림 16. 간단한 높이 맵
Fig. 16. Simple height map.

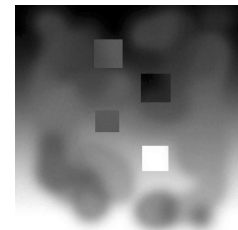


그림 17. 복합적인 높이 맵
Fig. 17. Complex height map.

(2) 실험 결과

위의 실험 지형에서 지형예측을 수행하고 그 결과를

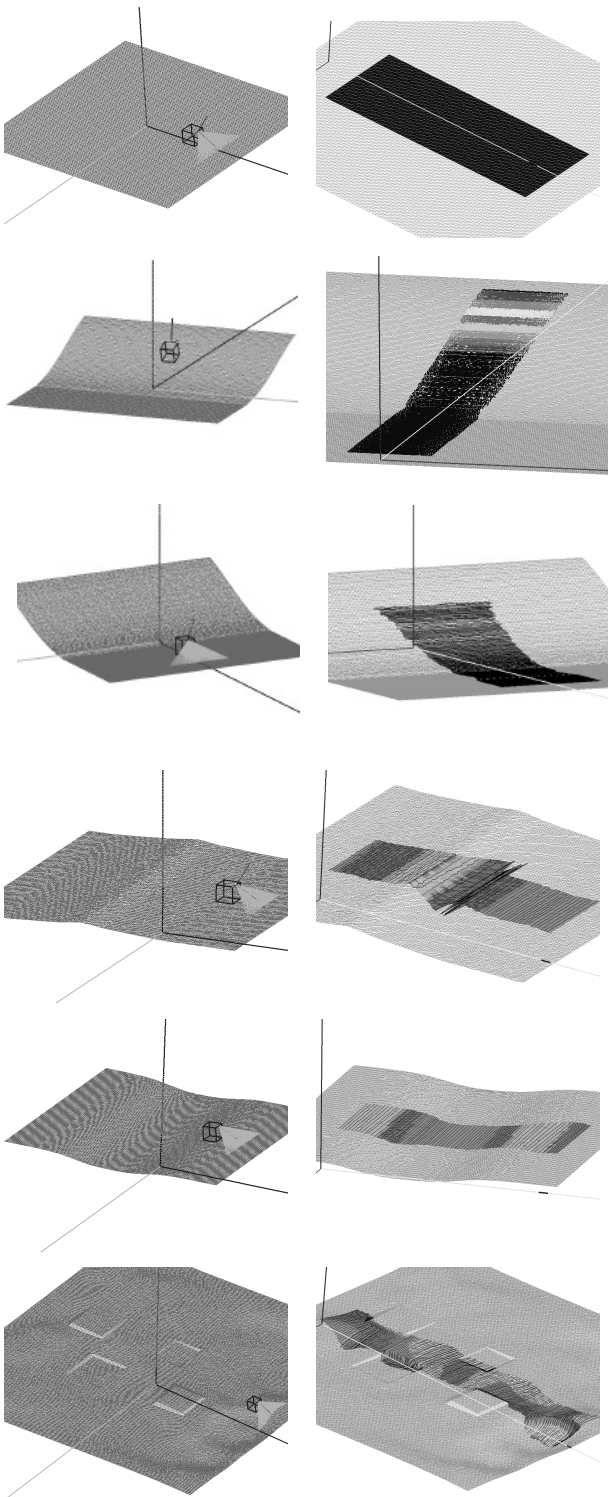


그림 18. 다양한 지형에 대한 시뮬레이션 결과
Fig. 18. Simulation results for various topographical map.

비교하였다. 그림 18의 좌측은 실험지형과 모바일 로봇의 모습이고 우측은 결과 값과 실험지형을 오버랩하여 표시한 것이다. 지형예측 결과와 실험지형이 일치하는 것을 확인할 수 있다. 실험지형의 순서는 위쪽부터 평

지, 오르막, 내리막, 언덕, 골짜기, 복합적 험지 순이다.

나. Heave 추정 알고리즘 검증

위의 시뮬레이션 결과를 살펴보면 실험 지형과 결과 값이 일치하는 것을 확인할 수 있으며 이를 통해 제안된 heave 추정 알고리즘이 올바르게 동작하는 것을 알 수 있다. 그림 19는 언덕과 골짜기가 복합된 지형에서의 heave 추정 결과를 나타낸다. 이 때 에러 값을 구하는 방법은 식 (4)와 같은 방법을 사용하였다. H_p 는 보 간법을 이용하여 구한 heave 값이며 H_o 는 실험 지형의 높이 맵에서 얻은 heave 값이다.

$$error = \left| \frac{H_p - H_o}{H_o} \right| \times 100 \quad (4)$$

복합적인 지형요소가 있는 실험지형을 10m 주행 하였을 때의 오차가 약 2% 이내로 나타나는 것을 확인할 수 있다.

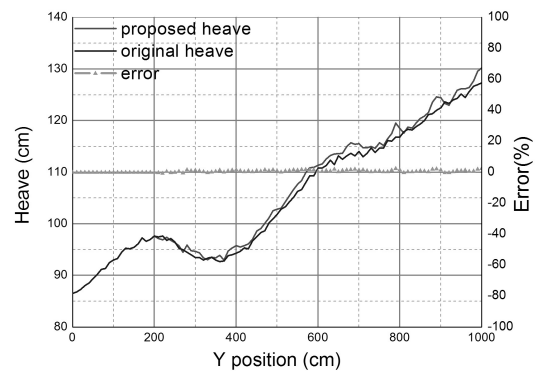


그림 19. Heave 추정 알고리즘에 대한 성능 평가
Fig. 19. Performance evaluation of the heave estimation algorithm.

다. 실제 시스템 실험 결과

다양한 장애물과 경사로를 놓고 지형예측을 수행하고 결과를 확인해 보았다. 실험 지형에 대한 사진과 해당 사진과 같은 시점으로 바라본 quarter view 실험 결과, front, left view에 대한 지형예측 결과를 기록하였다.

그림 20은 3차원 plot시 알아보기 쉽게 하기 위하여 특이한 형태의 장애물들을 놓고 실험해본 결과이다. 그림 20의 (b)를 보면 그림 20의 (a)의 기타 형상을 확인할 수 있다.

그림 21은 경사로를 오르며 경사로 위에 있는 장애물

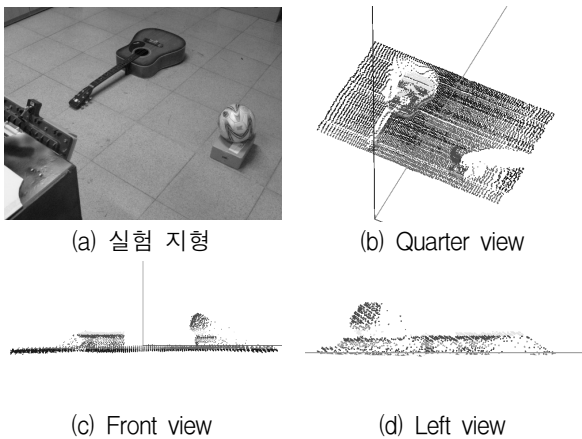


그림 20. 장애물 측정 실험 결과
Fig. 20. Result of measuring obstacle.

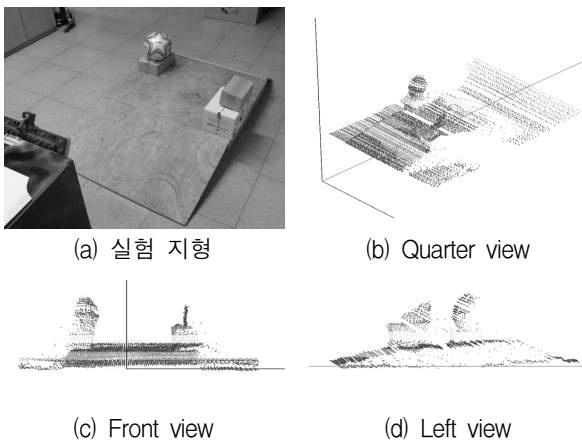


그림 21. 경사로에서 실험 결과
Fig. 21. Result of measuring on a slope.

을 측정하는 것이다. 이러한 실험을 통해 로봇에 기울기가 발생하였을 경우 이를 보상하여 지형을 측정할 수 있는지와 heave 추정 알고리즘이 적절하게 수행되는지를 확인할 수 있다. 그림 21의 (a)는 경사로와 장애물의 모습이며 로봇이 경사로를 오르며 지형을 측정하였다. 그림 21의 (b)를 보면 박스위에 올라가 있는 공의 모습을 확인할 수 있으며 그림 21의 (d)의 경우 경사로의 각도를 확인할 수 있다.

V. 결 론

본 논문에서는 레이저 거리측정기 기반의 선행지형예측시스템에서 로봇을 localization 할 때 기존의 가속도 센서 기반의 heave 값 획득 방법의 문제점을 개선한 새로운 heave 추정 알고리즘에 기반 한 방법을 제안하였다. 제안한 heave 추정에 기반 한 방법은 가속도 기반 센서

를 사용하지 않고 2축 기울기 센서와 선행지형정보를 이용함으로써 잦은 가속과 감속을 반복하는 모바일 로봇 시스템에서 저비용으로 신뢰성 있는 결과를 기대할 수 있다. Heave 추정 알고리즘을 시뮬레이터와 실제 시스템에 적용한 실험 결과로부터 제안된 선행지형예측시스템과 heave 추정 알고리즘이 지형예측을 수행함에 있어서 충분한 성능을 보임을 증명하였다.

참 고 문 헌

- [1] SICK, Telegrams for Operating/Configuring the LMS 2xx Laser Measurement Systems, SICK AG, Germany, April 2003.
- [2] S. Thrun et al., "Stanley: The robot that won the DARPA grand challenge: Research articles," J. Robot. Syst., vol. 23, no.9, pp. 661-692, 2006.
- [3] P. Lamon, S. Kolski, and R. Siegwart, "The SmartTer - a vehicle for fully autonomous navigation and mapping in outdoor environments," in Proceedings of CLAWAR 2006, Brussels, Belgium, 2006.
- [4] 정지훈, 안광호, 강정원, 김우현, 정명진, "무인 차량의 자율 주행을 위한 2차원 레이저 거리 센서와 카메라를 이용한 입방형 격자 기반의 3차원 지형 형상 복원," 전자공학회논문지 제45권 SC편, 제6호, 26-34쪽, 2008년 11월
- [5] 노이주, 김남운, 윤기방, 정경훈, 강동욱, 김기두, "지상라이다 데이터를 이용한 구조물 윤곽선 자동 추출 알고리즘 연구," 전자공학회논문지 제46권 IE 편, 제1호, 7-15쪽, 2009년 3월
- [6] 김시중, 안광호, 성찬훈, 정명진, "다중센서 융합상이 지도를 통한 다중센서 기반 3차원 복원 결과 개선," 로봇학회 논문지, vol. 4, no. 4, pp. 298-304, 2009.
- [7] D. H'ahnel and W. Burgard, "Probabilistic matching for 3d scan registration," Department of Computer Science, University of Freiburg, 2002.
- [8] D. M. Cole and P. M. Newman, "Using laser range data for 3D SLAM in outdoor environments," in IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, Orlando USA, pp. 1556-1563, May 2006.
- [9] V. Nguyen, A. Martinelli, N. Tomatis, and R. Siegwart, "A comparison of line extraction algorithms using 2d laser rangefinder for indoor mobile robotics," in Proc. Intelligent Robots and Systems, pp. 1929-1934, August 2005.
- [10] R. A. Lewis and A. R. Johnston, "A scanning

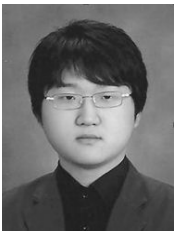
laser rangefinder for a robotic vehicle,” in Proc. 5th Int. Joint Conf. Artificial Intelligence, Cambridge, MA, Aug. 22-25, pp. 762-768, 1977.

[11] H. Surmann, K. Lingemann, A. Nüchter, and J. Hertzberg, “A 3d Laser Range Finder for Autonomous Mobile Robots,” in Proc. 32nd International Symposium on Robotics, Zurich, Switzerland, September, pp. 153-158, April 2001.

[12] O. Wulf and B. Wagner, “Fast 3d scanning methods for laser measurement systems,” Int. Conf. on Control Systems and Computer Sci, vol. 1, Bucharest, Romania, pp. 312 - 317, July 2003,

[13] 김경태, 송영재, “임의로 주어진 점에 관한 다변량 보간법” 정보과학회 논문지, vol. 10, no. 1, pp. 5-11, 1983.

— 저 자 소 개 —



김 태 원(정회원)
 2009년 충남대학교 메카트로닉스
 공학과 졸업(학사)
 2011년 충남대학교 메카트로닉스
 공학과 졸업(석사)
 2011년~현재 한국원자력연구원

<주관심분야 : 컴퓨터비전, 영상인식, 3차원 복원,
 스테레오 비전>



김 진 형(학생회원)
 2010년 충남대학교 메카트로닉스
 공학과 졸업(학사)
 2010년~현재 충남대학교 메카트
 로닉스공학과 석사과정
 <주관심분야 : 영상처리, 스테레
 오비전>



김 성 수(정회원)
 1988년 미국 아이오아대학
 기계공학, 박사
 1983년 미국 아이오아대학
 기계공학, 석사
 1981년 서울대학교 농공학
 (기계전공), 학사

1988년 미국 아이오아대 CAD센터 선임연구원
 1989년 미국 아이오아대 기계공학과 조교수
 1993년~현재 충남대학교 메카트로닉스공학과
 교수

<주관심분야 : 다물체 시스템 동역학, 차량 동역
 학, 로봇틱스, 탄성다물체 동역학 및 제어>



고 윤 호(평생회원)-교신저자
 1995년 부산대학교 전자공학과
 학사 졸업
 1997년 한국과학기술원 전기및
 전자공학과 석사 졸업
 2002년 한국과학기술원 전기및
 전자공학과 박사 졸업

2002년~2004년 하이닉스반도체 선임연구원
 2004년~현재 충남대학교 메카트로닉스공학과
 부교수

<주관심분야 : 영상신호처리, 컴퓨터비전, 영상인
 식, 영상압축>