

모바일 로봇의 경사 주행 시 3차원 지도작성 알고리즘

A 3D Map Building Algorithm for a Mobile Robot Moving on the Slanted Surface

황요섭, 한종호, 김현우, 이장명*

(Yo-Seop Hwang¹, Jong-Ho Han¹, Hyun-Woo Kim¹, and Jang-Myung Lee¹)

¹Pusan National University

Abstract: This paper proposes a 3D map-building algorithm using one LRF (Laser Range Finder) while a mobile robot is navigating on the slanted surface. There are several researches on 3D map buildings using the LRF. However most of them are performing the map building only on the flat surface. While a mobile robot is moving on the slanted surface, the view angle of LRF is dynamically changing, which makes it very difficult to build the 3D map using encoder data. To cope with this dynamic change of the view angle in build 3D map, IMU and balance filters are fused to correct the unstable encoder data in this research. Through the real navigation experiments, it is verified that the fusion of multiple sensors are properly performed to correct the slope angle of the slanted surface. The effectiveness of the balance filter are also checked through the hill climbing navigations.

Keywords: 3D map-building, mobile robot, LRF, balance filters, slanted surface

I. 서론

이동로봇은 지도를 이용하여 경로계획, 위치추정 등 다양한 작업을 수행하므로, 지도는 이동로봇에게는 매우 필수적 요소이다[1,2]. 지금까지 국내 연구로 실내 환경에서 3차원(three-dimensional) 지도 작성에 관하여 연구들이 진행되어 왔다. 국내 연구의 실내 환경에서는 모바일 로봇이 평지 면에서 문턱과 같은 곳에서 경사를 생성하는 실험을 많이 진행 하였지만, 모바일 로봇이 경사진 곳을 지날 때, 맵 빌딩에 대해 연구된 사례가 아직은 없다. 또한 미지의 지형에서 이동로봇이 자율주행하기 위해서는 장애물을 극복하거나 회피해야 하는지에 대한 판단을 해야 한다. 이를 위해서 우선 주변 지형에 대한 정보를 제공할 수 있는 지도가 요구되며, 초음파 센서나 레이저 스캐너를 사용하여 지도 작성에 대한 연구의 대다수가 장애물의 존재 여부를 판단하여 장애물을 회피 대상으로 간주 되었다. 먼저 본 연구에 앞서 모바일 로봇을 이용하여 3차원 맵을 구현하기 위해서는 차원에 대하여 간략하게 알고 있어야 한다. 우리가 일반적으로 알고 있는 1차원은 점이나 선으로 이루어져 있고, 2차원은 면으로 이루어져 있어 넓이를 가지게 되고, 3차원은 1,2차원이 가지는 길이, 넓이 외에 부피를 가지게 된다. 기존에 사용되는 LRF (Laser Range Finder)는 2차원 공간을 스캔하여 이동로봇의 장애물 인식을 통한 회피(obstacle

avoidance)나 경로 계획(path planing)에 사용되는데, 이런 모바일 로봇은 주위 환경에 큰 영향을 받으면서 환경적 변화에 의존하고 있다. 이런 환경 속에서 모바일 로봇을 이용한 실내·외 환경의 위치를 추정된 모델로 하여 2차원 격자지도나 3차원 지도를 연구하는 프로젝트가 활발하게 진행되고 있다[3-5].

실외 환경에서 표현하는 대표적인 방법 중에 3차원 지도로 그리는 방법을 고도지도(elevation map)라 말하며 DSM (Digital Surface Map)과 함께 사용한다. 보통의 2차원 격자지도는 3차원으로 확장한 개념으로 octree 형태의 데이터 구조로 표현하는 방식이고 3차원 공간에 대한 점유/비 점유 정보를 저장해야 하므로 메모리를 매우 많이 필요로 하며, 지도 작성 자체가 어려운 단점이 있다. 하지만, DSM의 경우는 2차원 격자지도 형태의 데이터 구조에 점유/비 점유 정보가 아닌 고도 정보가 저장된 형태를 하고 있어 단점을 보완하고 GPS (Global Positioning System) / INS (Inertial Navigation System)센서에 LRF 센서를 이용하여 3차원 지도를 구현하는데 큰 장점을 가지고 있다[6,7].

실내 환경에서는 LRF 센서를 이용하는 방법으로 카메라와 LRF센서를 이용하여 맵 빌딩(map building)하는 것인데, 카메라 시각내의 3차원 평면 영상 정보를 LRF는 2차원 평면상의 거리 정보를 제공해준다[8-10]. 또 다른 하나의 방법으로는 액추에이터에 LRF 센서를 고정하고 2차원 평면상과 상하 평면상의 정보를 얻어 3차원 지도를 얻는 방법을 쓰고 있다. 하지만 두 가지 방법들은 평면상에서만 3차원 지도를 얻을 수 있다는 한계점이 있다. 모바일 로봇에 적용하였을 시, 보통 경사도 주행을 하지 않고 평지에서 주행을 하고 일정 공간을 스캔을 하여 2차원, 3차원 맵을 구현하게 된다. 본 논문에서는 단일 LRF를 이용하여 모바일 로봇이

* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수: 2011. 7. 14., 수정: 2011. 9. 16., 채택확정: 2011. 12. 14.

황요섭, 한종호, 김현우, 이장명: 부산대학교 전기전자공학부

(mmx001@pusan.ac.kr/gkswhdgh114@pusan.ac.kr/hyunwoo1687@pusan.ac.kr/jmleel@pusan.ac.kr)

※ 본 연구는 지식경제부 및 정보통신산업진흥원의 특수환경 Navigation/Localization 기술 연구센터 지원사업의 연구결과로 수행되었음(NIPA-2010-(C7000-1001-0004)).

경사도 주행을 할 때, 3차원 맵을 구현 할 수 있는 시스템을 구현 하였다. 우선, IMU (Inertial Measurement Unit)센서를 이용하여 절대 각도와 상대 각도 기준을 두고 LRF의 데이터 값을 얻은 정보를 밸런스 필터를 적용하여 보정하고 3차원으로 맵에 적합하게 구현을 하였다.

II 장에서는 IMU와 밸런스 필터 융합의 결과 타당성의 유무를 판단, III 장에서는 지도의 작성에 대한 설명, IV 장에서는 실험을 통해 실제 모바일 로봇의 경사 주행 시 3차원 맵을 잘 구현 하는지를 검증하였다. 마지막으로 V 장에서는 결론을 제시함으로써 이 논문을 마무리 한다.

II. IMU/밸런스 필터 융합

1. 자이로 센서를 이용한 각도 검출

자이로 센서는 출력 값을 적분하여 각도를 검출하는 센서이다. 이 센서를 이용하여 각도를 구하기 위해서는 초기 상태가 이루고 있는 각도에 센서로부터 계산된 회전각을 누적시켜서 얻는 방법이다. 만약, 일정한 주기로 센서의 값을 읽어올 때의 회전각은 다음과 같이 나타낸다.

$$\text{각도} = \text{누적된 회전각} + (\text{각속도} * \text{샘플링 시간})$$

따라서 자이로 센서는 회전각을 누적시켜 각도를 구하기 때문에 센서로부터 얻은 값의 정확도가 떨어지며, 시간이 지남에 따라 누적되는 오차가 커진다는 한계가 있다.

2. 가속도 센서를 이용한 각도 검출

가속도 센서는 직선방향으로의 단위시간에 대한 속도를 미분한 값을 나타내는 센서이다. 그림 1은 가속도 센서를 모바일 로봇의 수평 방향 일 때 Z축 방향으로 중력가속도 값(1G)을 가지게 되고, 수평 상태에서 X축과 Y축을 가지며 그 축으로 기울기를 얻게 되는데 이 특성을 이용하여 기울어진 각도를 검출하여 값을 얻을 수 있는 것이다.

x축 방향의 가속도 성분 벡터를 A_x 로 나타내고 y축 방향의 가속도 성분 벡터를 A_y 로 나타내고 z축 방향의 가속도 성분 벡터를 A_z 라고 정의하고 그림 2에 나타내었다.

위에서 벡터 A가 현재 센서가 받고 있는 가속도를 의미하고, 벡터 a를 X-Y 평면에 투영한 벡터 a는 식 (1)과 같다.

$$a = \sqrt{A_x^2 + A_y^2} \tag{1}$$

벡터 A와 벡터 a 사이의 각 ρ 는 피타고라스의 정리에 의해 아래와 같은 식 (2)로 된다.

$$\tan \rho = \frac{A_z}{\sqrt{A_x^2 + A_y^2}} \tag{2}$$

각 ρ 는, 삼각함수의 정의에 따라 식 (3)같이 나타낼 수 있다.

$$\rho = \arctan\left(\frac{A_x}{\sqrt{A_y^2 + A_z^2}}\right) \tag{3}$$

자이로 센서로 구하는 각도는 상대적인 각도를 구하게 되지만 가속도 센서는 수평상태에서 중력을 이용하며 각도를 구할 수 있다. 하지만 모바일 로봇이 이동하게 되면 가

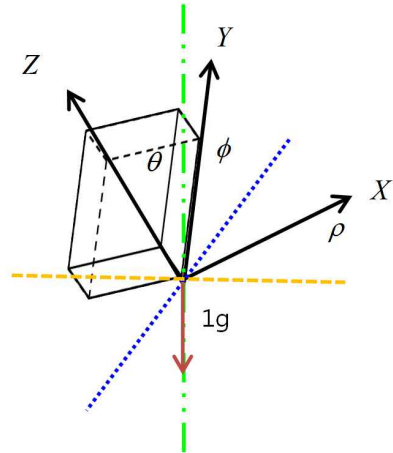


그림 1. 3차원에서의 기울기.
Fig. 1. Slope in the 3D space.

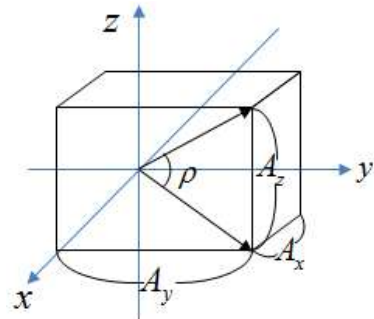


그림 2. 3차원에서 가속도 벡터 합성.
Fig. 2. Acceleration vector summation in the 3D space.

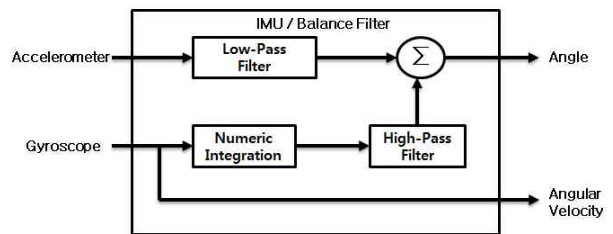


그림 3. 각도 보정 필터 블록도.
Fig. 3. Block diagram of the Angle correction filters.

속도 센서는 움직이는 축의 가속도가 증가하게 되어 정확한 각도를 얻기 힘들게 된다.

3. IMU와 밸런스 필터 적용

IMU 센서인 가속도와 자이로 센서는 운동특성에 정확한 각도 값을 얻을 수 있다. 가속도 센서는 정상 상태일 때, 특성이 좋고 자이로는 고주파 특성에 우수한 특성을 가진다. 따라서 가속도 센서는 low pass filter를 통과 시키고 자이로 센서는 high pass filter를 통과시킨 후에 나온 결과를 합하여 보정된 각도를 얻게 된다. 그림 3에는 IMU/밸런스 필터를 적용한 각도보정 필터를 나타낸다[11,12].

그림 3에서 보정된 각도 값은 식 (4)같이 나타낼 수 있다.

$$\text{angle}_i = a * (\text{angle}_{i-1} + \text{gyro} * \text{dt}) + (1-a) * (x_acc) \tag{4}$$

- Sample Period : 0.01 sec

$$T = \frac{1}{f} \text{ (sample rate = 100Hz)}$$

- Time Constant : 0.623 sec

$$t = \frac{a * dt}{1 - a}$$

- filter coefficient : 0.98 sec

$$a = \frac{t}{t + dt}$$

식 (4)의 a는 필터 상수고, angle_{i-1}은 이전의 각을 의미한다. gyro는 자이로 센서에서 측정된 각속도이며, dt는 자이로 센서의 샘플링 타임을 이야기하고, x_acc는 가속도 센서의 x축 측정값을 이야기한다. 필터 상수 a를 구하기 위해서는 센서의 샘플링 타임과 센서의 샘플링 타임과 요구되는 시정수를 안다면 위의 식을 통해 필터 상수 a를 구할 수 있다. 샘플링 타임은 사용자의 필요에 맞게 정할 수 있으며 우리는 100Hz로 결정했다. 시정수는 출력 신호 변화가 정상 최종 값의 62.3%에 도달하는데 걸리는 시간으로 샘플 주기시간에 62.3을 곱하여 구할 수 있다.

그림 4에서 첫 번째 그래프는 자이로 센서만 사용하여 측정된 각속도의 적분을 통하여 얻은 각도 값을 그래프로 나타내었다. 이 그래프에서 보듯이 반복되는 상하 운동에 대한 각의 정확도가 점점 떨어질 뿐만 아니라 상하 운동을 멈춘 후에는 발산하는 현상이 나타나는 것을 볼 수 있다.

두 번째 그래프는 가속도 센서만을 이용하여 중력가속도에 의한 기울기 값을 나타낸 그래프이다. 그래프에서 보듯이 측정값에 많은 잡음이 섞여있는 것을 확인할 수 있다.

세 번째 그래프는 IMU 센서를 이용하여 밸런스 필터를 적용한 그래프이다. 자이로의 각속도를 이용하여 각을 측정하는 그래프에 비해 발산 없이 안정적으로 각이 산출되는 것을 볼 수 있다. 그리고 가속도 센서를 이용한 그래프에 비해 잡음이 현저하게 줄어든 것을 볼 수 있다. 자이로와 가속도를 융합한 IMU 센서와 밸런스 필터를 통하여 필터링함으로써 두 센서의 단점을 보완할 수 있을 뿐만 아니라 참 값에 가까운 값을 얻을 수 있다.

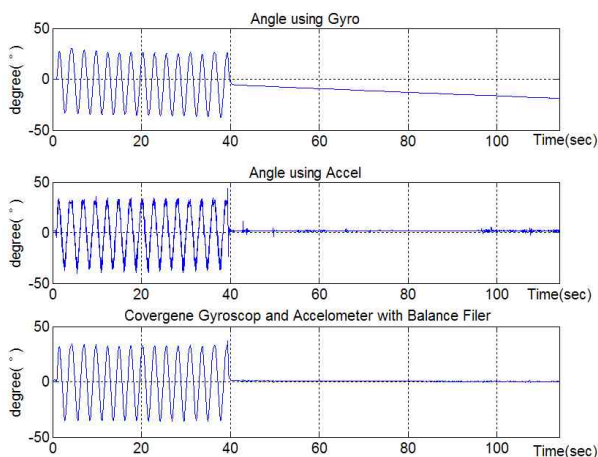


그림 4. IMU/ 밸런스 필터에 의한 각도보정.
Fig. 4. Compensations by IMU/balance filter.

III. 지도 작성

본 논문에서 지도를 작성하기 위해 엔티렉스사의 주행로봇 NT-TANK-LL 모델로 10W급 DC 모터와 256 pulse/rotate 정밀도를 갖는 광학식 엔코더가 내장되어 있는 것을 사용한다. 거리센서로는 Hokuyo사의 실내 환경 레이저 스캐너인 URG-04LX 모델로 RS-232통신 인터페이스로 구성되어 있으며, LRF의 2차원 평면 측정범위는 360°을 기준으로 240°를 0.36° 간격으로 측정 가능하며, 최대 측정거리는 4000 mm이다. 또한 서보모터 2개를 이용하여 레이저 스캐너의 기울임 각도를 조절하였고, 모터의 엔코더를 이용하여 로봇의 Z(Yaw)축 data를 측정한다. 모바일 로봇의 전방 진행 방향으로 하여 IMU의 가속도 센서를 X(Roll)축에 배치하였고, 자이로 센서는 Z(Yaw)축과 Y(Pitch)축에 배치하였다[9,10,13,14].

그림 6은 전체 시스템 블록도로 IMU는 3축 가속도 1개, 1축 자이로 센서 2개로 구성되고 MCU는 TI사의 TMS320F28335를 사용하였다. 3축 가속도 센서는 VTI Technologies사의 SCA3000-D 01(±2g), 자이로 센서는 Analog Devices사의 ADIS6100(±300°/s)를 사용한 모듈로 구성된다. 양방향 무선 통신 카메라 DRC 모듈은 영상정보와 원격 제어 기능이 함께 되어있는 모듈이다. DRC 모듈을 통해서 원격 제어를 하며, 모바일 로봇의 QEI를 통하여 엔코더 값을 처리한다. 자이로와 가속도센서 값을 DRC Station을 통하여

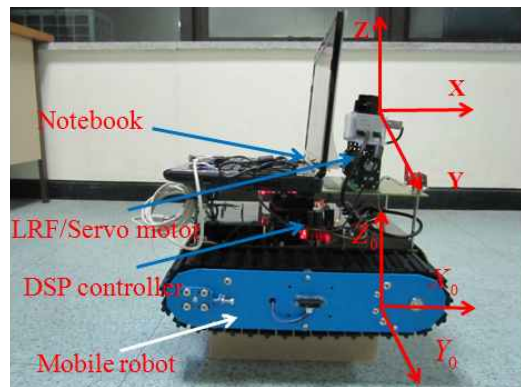


그림 5. LRF 시스템의 구성.
Fig. 5. Measurement range of LRF system.

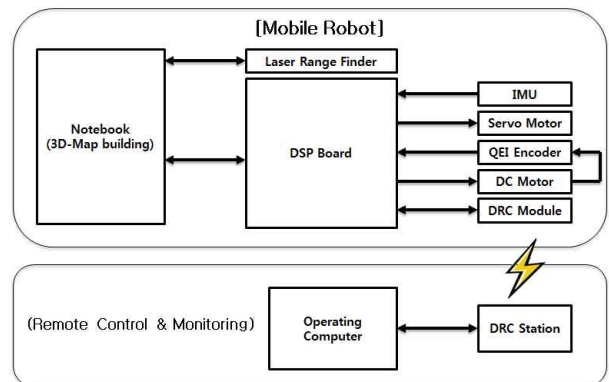


그림 6. 전체 시스템 블록도.
Fig. 6. Overall system block diagram.

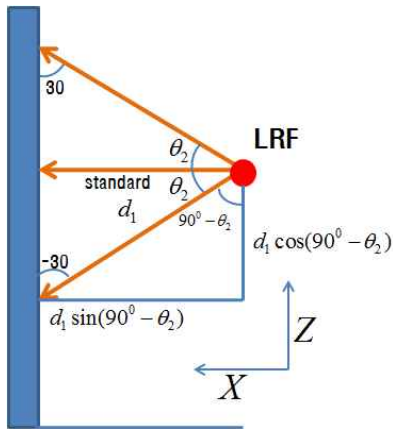
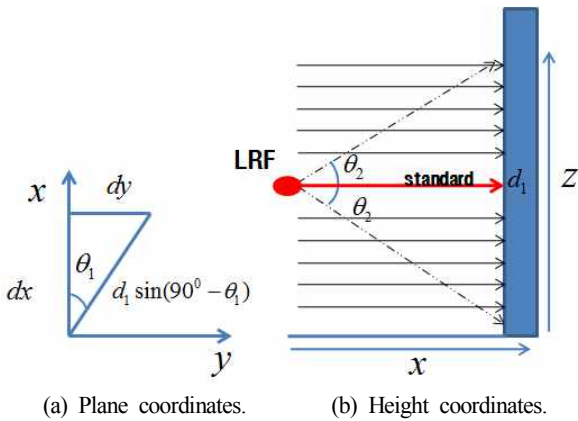


그림 7. LRF 측정 원리.

Fig. 7. Principle of measuring LRF.



(a) Plane coordinates.

(b) Height coordinates.

그림 8. LRF 각도의 거리 수정.

Fig. 8. LRF modification of the angle distance.

Operating Computer로 전송하여 모니터링을 수행하도록 한다. 일반적으로 LRF 센서의 거리 데이터를 이용하여 2차원 지도 맵을 작성하기 위해서는 선행적으로 방향을 알아야한다. 방향성은 X와 Y의 방향성을 나타내고 식 (5)을 이용하여 구한다[11].

$$\begin{aligned} X &= \cos(\theta_1) \\ Y &= \sin(\theta_1) \end{aligned} \quad (5)$$

식 (5)에서 X는 모바일 로봇에 부착 되어있는 LRF 전방의 거리를 나타내며, Y는 좌우 쪽의 거리를 나타낸다.

그림 7은 LRF의 옆면에서 본모습이며 3D 맵을 그리기 위한 기울기에 따른 방법을 나타내었다. θ_2 는 모터의 기울기이며, d_1 은 LRF의 측정거리이다. Standard θ_2 가 0° 일 때 기준 data로 잡는다. X축에서 θ_2 에 따른 거리 값이 dx 이며, dx 관한 식은 $d_1 \sin(90^\circ - \theta_2)$ 으로 나타낸다. z축에 θ_2 의 높이를 dz 로 나타내고, dz 에 따른 정리된 식은 $d_1 \cos(90^\circ - \theta_2)$ 이며, 거리와 높이에 관하여 식 (6)이 된다.

$$\begin{aligned} dx &= d_1 \sin(90^\circ - \theta_2) \\ dz &= d_1 \cos(90^\circ - \theta_2) \end{aligned} \quad (6)$$

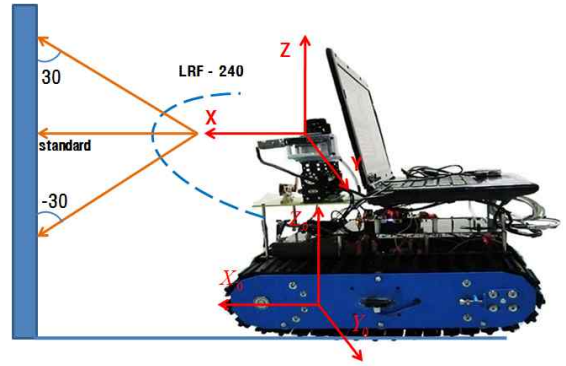


그림 9. LRF 좌표계 및 측정범위.

Fig. 9. LRF coordinates and location set.

그림 8(a)는 LRF의 위에서 본모습이다. 좌우에 따른 거리를 dy 로 나타내었으며, dy 관한 식은 $d_1 \sin(90^\circ - \theta_1)$ 로 나타내면 식 (7)과 같이 된다.

$$dy = d_1 \sin(90^\circ - \theta_1) \quad (7)$$

식 (5) 방향성 X와 Y, 식 (6)의 전방의 거리 dx 와 지면에서의 높이 dz , 식 (7)의 좌우에 따른 거리 dy 를 합치게 되면 식 (8)과 같이 된다.

$$\begin{aligned} dx &= d_1 \sin(90^\circ - \theta_2) * \cos(\theta_1) \\ dy &= d_1 \sin(90^\circ - \theta_1) * \sin(\theta_1) \\ dz &= d_1 \cos(90^\circ - \theta_2) \end{aligned} \quad (8)$$

식 (8)을 이용하게 되면 그림 8(b)와 같이 각도에 따라서 달라진 거리 값이 기준으로 사용한 Standard값과 같이 보정된다. 그림 9는 실제 모바일 로봇이 측정을 하였을 때의 모습이다. LRF는 X기준으로 서보모터를 이용하여 위로 30° 와 아래로 -30° 기준 레벨을 두고, 좌우 dy 에는 240로 측정하였다. 모바일 로봇이 지면이 변화가 될 때에, 즉 경사면을 올라 갈 때에는 X. 인 모바일 로봇과 지면 평지에서는 0으로 기준을 두었다. 자이로의 X축 측정 한각을 g_x 라고 하였으며 g_x 와 X. 차이각도를 \angle_1 로 나타내었다. 평지 때는 \angle_1 이 '0'으로 나타나며, '0'이 아니면 지면 변화가 있는 것으로 판단한다. 차이각도를 \angle_1 변화 값만큼 엔코더에 더하여 \angle_2 의 서보모터 변화량이 결정이 되며 식 (9)와 같이 된다.

$$\begin{aligned} X_0 &= 0 \\ \angle_1 &= g_x - X_0 \\ \angle_2 &= \angle_1 + \text{encoder} \end{aligned} \quad (9)$$

또한 모바일 로봇의 Roll각의 변화는 적응하는 단계에서 IMU 센서의 Roll기울기를 적응에 반영하여 3차원 지도를 작성한다. 식 (10) 같다.

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & 0 & \sin\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\theta & 0 & \cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \quad (10)$$

위의 식은 LRF를 기준으로 한 좌표계에 Roll각의 변화를

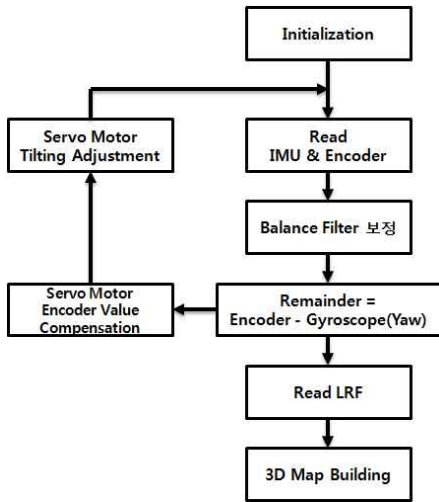
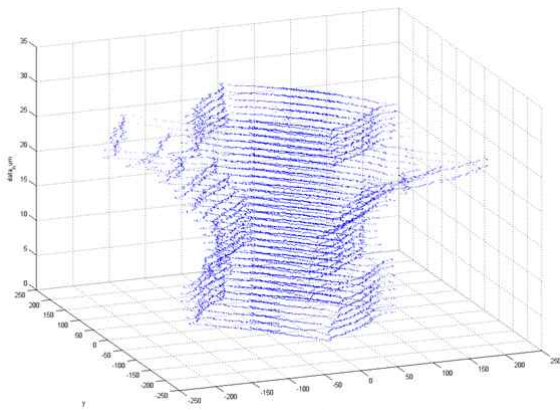


그림 10. 모바일 로봇의 전체 흐름도.
Fig. 10. Flow chart of the mobile robot.



(a) The Experimental environment.



(b) Three-dimensional before correction.

그림 11. 실험환경 그리고 보정 전 3차원 영상.
Fig. 11. The Experimental environment and three-dimensional before correction.

적용하여 좌표계를 회전하여 3차원 지도를 작성할 수 있다. 이 식에서 θ 는 Roll 각이고, x, y, z 는 스캔된 점들의 좌표다. 그리고 x', y', z' 는 좌표계 회전을 통해 얻어진 보정된 스캔 좌표점이다.

그림 10은 모바일 로봇의 전체 흐름을 나타내고 있다. IMU로부터 수신한 자이로의 Pitch 축 각과 엔코더 각을 비

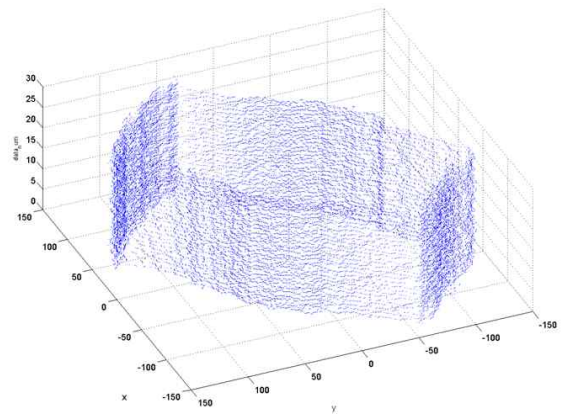


그림 12. 보정 후 3차원 영상.
Fig. 12. Three-dimensional image after correction.

교하고, 각도에 차이를 서보모터의 각도 조절에 반영하여 항상 LRF의 스캔 각도를 일정하게 유지할 수 있도록 한다. 보정된 각도에 의해 LRF를 통해 스캔 데이터와 IMU/밸런스 필터 융합에 의해 보정한 후 3D 맵 빌딩을 수행한다.

그림 11(a)에는 상자를 만들어 서보모터를 이용하여 -30도에서 +30로 LRF 센서로 통하여 거리 값을 받아서 적층하여 3차원으로 나타낸 것이다. 그림 11(b)는 서보모터의 엔코더를 이용하여 각도를 추출하여 각각의 각도에 따라 거리 값을 적층을 하였다. 그러나 각도에 따라 물체에 도달하는 거리 값이 달라지기 때문에 명확한 사물의 형태를 나타내기 힘들다.

그림 11(b)에서 각도에 따른 거리 값을 보정하게 되면 그림 12가 된다. 보정 전에 비하여 보정 후 실물에 한층 더 형태와 비슷한 것을 알 수 있다.

IV. 실험 및 결과

1. 실험환경

본 논문에서 제안하는 알고리즘을 적용하여 그림 13에 1, 2, 3의 환경 조건을 두어 모바일 로봇이 경사 주행을 할 때의 3차원 영상을 얻기 위한 조건을 나타낸다. 환경 1에서 경사면을 올라갈 때이며, 환경 2는 경사면에 올라가 있을 때, 환경 3은 경사면을 내려올 때를 나타낸다. 그림 14는 실제 실험 장소에서 조건에 맞게 실험을 한 사진이다.

그림 15는 자이로센서를 통하여 지면의 각도 값을 가속도센서의 값을 밸런스 필터를 이용하여 모바일 로봇의 각도 값을 보정하여 나타내었으며, 평지 상태에서 언덕으로 올라가는 모습이며, 지면이 평지에서는 '0'으로 나타나며 언덕으로 올라갈 때 음수각도로 변하므로 음수로 나타나며, 모바일 로봇의 구동 시간은 20초가 걸린다. 밸런싱 필터를 통하여 얻은 각도 값을 이용하여 위치변화에 따라 모바일 로봇에 부착되어있는 서보모터 측정각도가 변화되어도 동일한 실험 환경을 측정 할 수 있었다.

그림 16은 알고리즘 적용하기 전의 모습을 나타낸다. 각도에 따른 거리 값에 의하여 형태의 굴곡이 생기는 모습을 보여준다. 그림 17은 알고리즘을 적용한 후 3차원 영상을 보여 준다. 좌우 벽면의 굴곡현상이 보정 되었다.

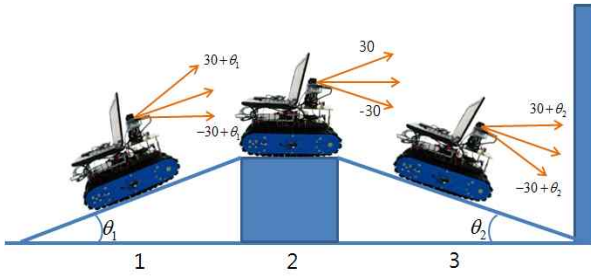


그림 13. 경사 주행 시 환경 조건 1, 2, 3.

Fig. 13. Environmental conditions 1, 2, and 3 for hill climbing.



그림 14. 경사 주행 시 실험 환경.

Fig. 14. Experimental environment on the slanted surface.

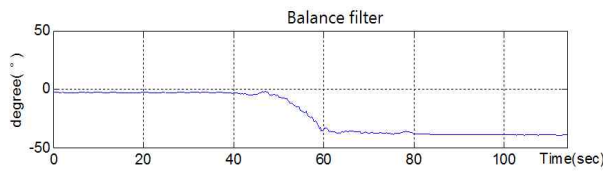


그림 15. 조건 1의 IMU/밸런스 필터 보정에 대한 결과 값.

Fig. 15. Results with corrections by IMU/balance filter condition 1.

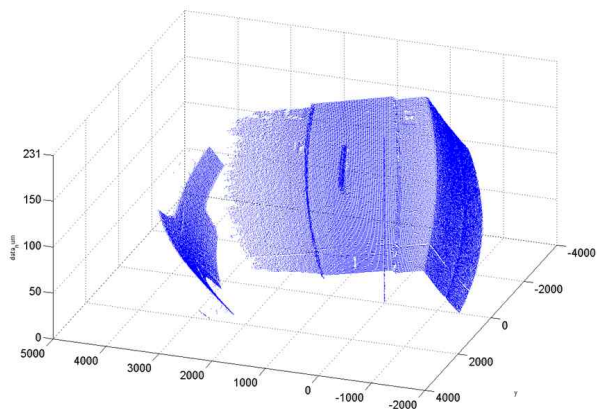


그림 16. 조건 1 환경 알고리즘 적용 전 3차원 영상.

Fig. 16. Encoder-based 3-D image for the environmental conditions 1.

그림 18은 자이로센서를 통하여 지면의 각도 값을 가속도센서와 밸런스 필터를 이용하여 모바일 로봇의 각도 값을 보정하여 나타내었다. 언덕위의 지면의 높이를 지나는 모습을 나타내고 있었다. 지면이 평지와 같이 기울기가 없

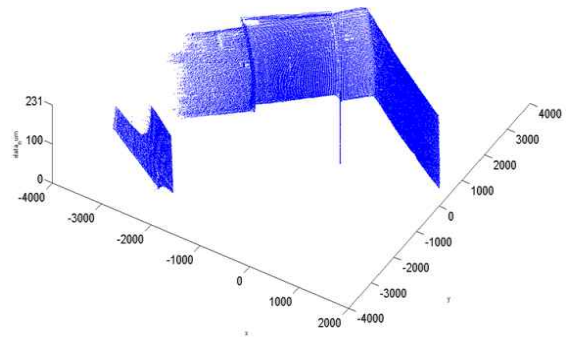


그림 17. 조건 1 환경 알고리즘 적용 후 3차원 영상.

Fig. 17. Filtered 3-D image on the environmental conditions 1.

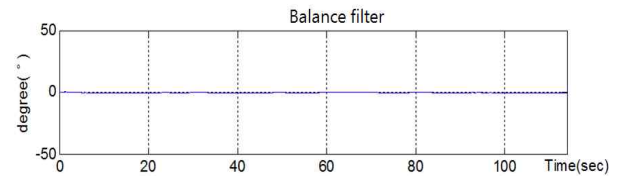


그림 18. 조건 2의 IMU/밸런스 필터 보정에 대한 결과 값.

Fig. 18. Results with corrections by IMU/balance filter condition 2.

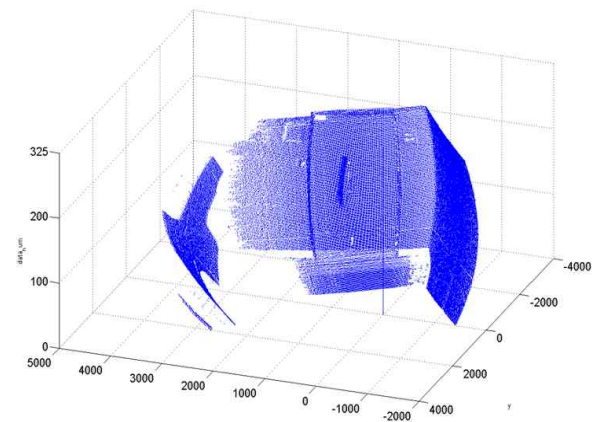


그림 19. 조건 2 환경 알고리즘 적용 전 3차원 영상.

Fig. 19. Encoder-based 3-D image for the environmental conditions 2.

으므로 '0'으로 나타나게 된다. 밸런스 필터를 통하여 얻은 각도 값이 '0'이므로 서보모터의 각도 변화가 없다. 측정각도의 변화가 없으므로 동일한 실험 환경으로 측정 되었다.

그림 18은 경사면 위의 각도 값을 나타내며, 지면이 평지이기 때문에 각도 값은 '0'으로 나온다. 그림 19는 알고리즘을 적용하기 전의 모습을 나타내며, 그림 20에서는 알고리즘을 적용한 후를 나타낸 모습이다. 그림에서 보듯이 적층한 높이 값이 변한 것을 알 수 있으며, 각도에 따라 거리변화 되어 굴곡현상이 사라진 것을 알 수 있다.

그림 21은 자이로센서를 통하여 지면의 각도 값을 가속도센서와 밸런스 필터를 이용하여 모바일 로봇의 각도 값을 보정하여 나타내었다. 평지 상태에서 언덕 위에서 아래로 내려가는 모습이며, 언덕에서 평지로 내려가는 각도 변

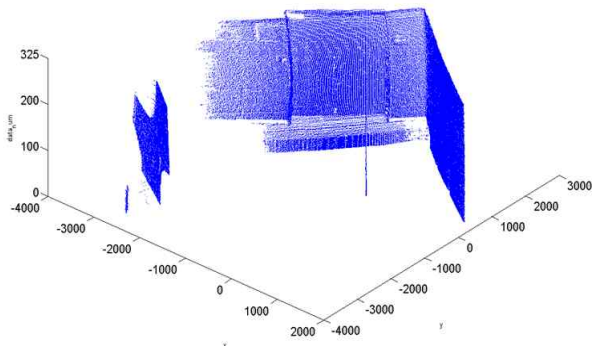


그림 20. 조건 2 환경 알고리즘 적용 후 3차원 영상.
Fig. 20. Filtered 3-D image for the environmental conditions 2.

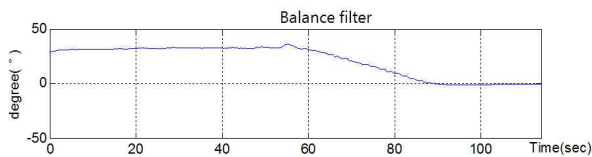


그림 21. 조건3의 IMU/밸런스 필터 보정에 대한 결과 값.
Fig. 21. Results with corrections by IMU/balance filter condition 3.

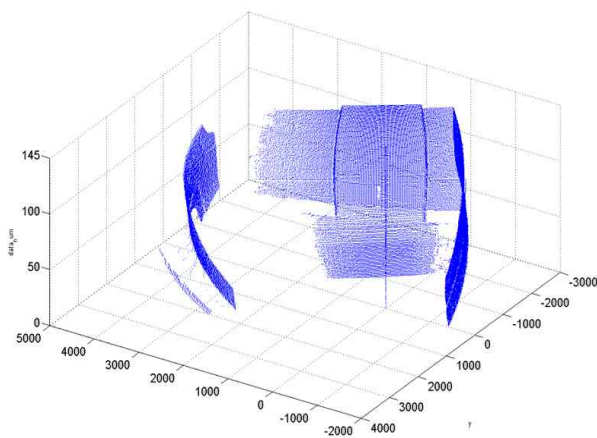


그림 22. 조건 3 환경 알고리즘 적용 전 3차원 영상.
Fig. 22. Encoder-based 3-D image for the environmental conditions 3.

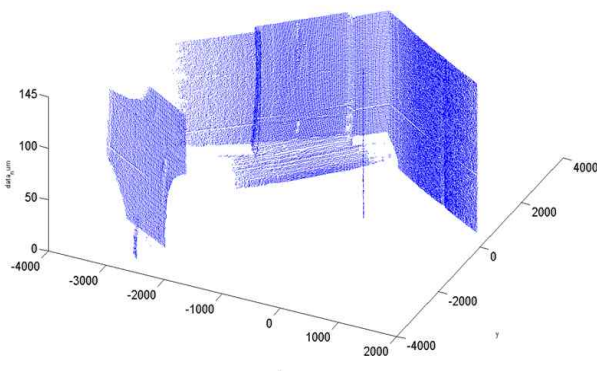


그림 23. 조건 3 환경 알고리즘 적용 후 3차원 영상.
Fig. 23. Filtered 3-D image for the environmental conditions 3.

표 1. 조건1,2,3 환경에 대한 오차율.

Table 1. Measuring efficiency for the environmental conditions 1, 2, 3.

실험	실제 거리	측정 평균	오차율
1	1750 (mm)	1740.549 (mm)	0.540071 %
2	1750 (mm)	1733.12 (mm)	0.964575 %
3	1750 (mm)	1761.603 (mm)	-0.66305 %

화를 나타내고, 모바일 로봇의 구동 시간은 20초가 걸린다. 밸런싱 필터를 통하여 얻은 각도 값을 이용하여 위치변화에 따라 모바일 로봇에 부착되어있는 서보모터 측정각도 역시 변화되었다.

그림 21에서는 경사면의 내려가는 각도 값을 나타내며, 각도 값이 양수에서 '0'으로 변화하는 것을 알 수 있다. 이를 통하여 위에서 아래로 내려오는 것을 알 수 있다. 그림 22는 알고리즘을 적용하기 전의 모습을 나타내며, 그림 23에서는 알고리즘을 적용한 후를 나타낸 모습이며, 각도에 따라 변화되어진 거리 값을 통해서 골목 되었던 것이 사라진 것을 알 수 있으며, 각도가 변하여도 동일한 환경을 측정 이 가능해진다.

또한 실험데이터의 오차율을 구하기 위해 우리는 실험 1, 실험 2, 실험 3에서 각각 스캔되어진 복도정면의 문의 가로 길이를 구하기 위해 양쪽 각이진 부분의 동일선상 좌표의 거리를 계산하고, 그림 14의 실제 문의 길이를 측정하여 오차율을 계산하였다. 그 결과 표 1과 같이 실험데이터의 평균값이 나왔고, 오차율은 1% 미만 인 것을 알 수 있었다.

V. 결론

본 논문에서는 경사면이 있는 실내 환경에서 3차원 지도작성 하는 방법을 제시하였고, 적용된 알고리즘이 타당성을 가지는지 실험을 통하여 검증하였다. 일반적으로 평지에서 서보모터의 엔코더 값을 적용하여 3차원지도 작성을 구현하지만 본 논문에서와 같이 경사면에서는 서보모터의 엔코더 값의 변화만으로는 바닥의 지형변화에 따른 보정을 할 수가 없다. 그리고 충분한 3차원 지도를 작성하기 위한 스캔 데이터도 얻을 수 없게 된다. 지형변화에 따른 각도 보정이 없이 측정하고자하는 환경에 대한 정확한 3차원 지도작성이 어렵기 때문에 IMU 센서와 밸런스 필터를 적용하여 3차원 지도 작성을 구현하였다. 우선 3가지 경사 조건을 두어 실험을 하였으며 모터의 엔코더 값은 로봇이 지형 변화에 따른 각도변화에 대한 상대적인 값의 오차를 가지고 있어 경사면에 적합하지 않다는 것을 실험을 통해 인식하였으며, 조건에 맞게 보정하기 위해 밸런스 필터의 적용을 하게 되었다. 본 연구를 통하여 평지에서 뿐만 아니라 경사면에서 3차원 지도 작성이 가능할 것이다. 현재 개발된 시스템은 Z축 각도변화에 대해서만 알고리즘을 적용하였지만, 앞으로는 실시간으로 동작하면서 자갈밭이나 지형이 평탄하지 않은 곳에서도 3차원 지도 작성을 할 수 있는 시스템을 구성하여 알고리즘을 적용할 예정이다.

참고문헌

- [1] Y. K. Choi, W. S. Choi, and J. B. Song, "Obstacle avoidance of a mobile robot using low-cost ultrasonic sensors with wide beamangle," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems (in Korean)*, vol. 15, no. 11, pp. 1102-1107, Nov. 2009.
- [2] J. T. Park and J. B. Song, "Efficient exploration for room finding using wall-following based path planning," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems (in Korean)*, vol. 15, no. 12, pp. 1232-1239, Dec. 2009.
- [3] W. J. Chung, D. H. Lee, and C. H. Choi, "The application of the LRF and mobile robot," *ICASE Magazine (in Korean)*, vol. 8, no. 5, pp. 17-22, Sep. 2002.
- [4] H. Surmann, A. Nuchter, and J. Hertzberg, "An autonomous mobile robot with a 3D laser range finder for 3D exploration and digitalization of indoor environments," *Robotics and Autonomous Systems*, pp. 181-198, Apr. 2003.
- [5] O. Wulf and B. Wagner, "Fast 3D scanning methods for laser measurement systems," Institute for systems engineering, 2003.
- [6] T. B. Kwon, J. B. Song, and S. C. Kang, "Extraction and matching of elevation moment of inertia for elevation map-based localization of an outdoor mobile robot," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems (in Korean)*, vol. 15, no. 2, pp. 203-210, Feb. 2009.
- [7] E. Shaffer and M. Garland, "A Multiresolution representation for massive meshes," *IEEE Trans on Visualization and Computer Graphics*, vol. 11, no. 2, pp. 139-148, Apr. 2005.
- [8] Y. S. Bok, Y. B. Hwang and I. S. Kweon, "CALOS: camera and laser for odometry sensing," *Journal of Intelligent Service Robotics (in Korean)*, vol. 1, no. 2, pp. 180-187, Dec. 2006.
- [9] T. Fujita and Y. Kondo, "3D terrain measurement system with movable laser range finder," *IEEE International Workshop on SSRR*, no. 2, pp. 1-6, Nov. 2009.
- [10] H. Surmann, K. Lingemann, A. Nuchter, and J. Hertzberg, "A 3D laser range for autonomous mobile robots," *Proceedings of the 32nd ISR*, pp. 153-158, Apr. 2001.
- [11] H.-J. Lee and S. Jung, "Gyro sensor drift compensation by Kalman filter to control a mobile inverted pendulum robot system," *Industrial Technology*, pp. 1-6, Feb. 2009.
- [12] C. W. Kang, Y. M. Yoo, and C. G. Park, "Performance improvement of attitude estimation using modified euler angle based Kalman filter," *Journal of Institute of Control Robotics and Systems (in Korean)*, vol. 14, no. 9, pp. 881-885, Sep. 2008.
- [13] D. Oritin, J. Neira, and J. M. M. Montiel, "Relocation using laser and vision," *IEEE international conference on Robotics and Automation*, vol. 2, pp. 1505-1510, 2004.
- [14] K. Ohno and S. Tadokoro, "Dense 3D map building based on LRF data and color image fusion," *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 2792-2797, 2005.



황요섭

2010년 진주산업대 메카트로닉스와 졸업. 2012년 부산대학교 로봇대학원 공학석사. 현재 동 대학원 전기전자 박사과정. 관심분야는 Haptics, 이족로봇 제어, Navigation and Localization 시스템.



한종호

2010년 진주산업대 전자공학과 졸업. 2012년 부산대학교 로봇대학원 공학석사. 현재 동 대학원 전기전자 박사과정. 관심분야는 지능제어시스템 제어, Navigation and Localization 시스템.



김현우

2011년 부경대학교 전자정보통신공학부 졸업. 2011년~현재 부산대학교 대학원 전자전기공학 석사과정 재학중. 관심분야는 지능제어시스템, Navigation and Localization 시스템, SLAM.



이장명

1980년 서울대학교 전자공학과 졸업. 1982년 동 대학원 공학석사. 1990년 USC(미국 남가주 대학교)공학박사. 1982년~현재 부산대학교 전자전기통신공학부 교수. 관심분야는 지능로봇시스템 제어, 특수환경 Navigation and Localization 시스템.