

전방향 3차원 센서를 이용한 무인 이동플랫폼의 위치추정 Localization of an Unmanned Ground Vehicle using an Omni-directional 3D Sensor

최성인 박순용 김준* 박용운*
Sung-In Choi Soon-Yong Park Jun Kim Park Yong Woon

경북대학교 컴퓨터공학과, *국방과학 연구소
ellim5th@naver.com, sypark@knu.ac.kr, wns3381@paran.com*, woon5901@hanafos.com*

ABSTRACT

A computer vision technique of estimating the location of an unmanned ground vehicle is proposed. Identifying the location of the unmanned vehicle is very important task for automatic navigation of the vehicle. Given a DSM (Digital Surface Map) data, location of the vehicle is estimated by the registration of the DSM and omni-directional range data obtained at the vehicle. Registration of the DSM and range images yields the 3D transformation from the coordinates of the range sensor to the reference coordinates of the DSM. To estimate the vehicle position, we register the range image in a pair-wise manner, followed by a refinement between the range images and the DSM. Experimental results from three outdoor road tests show that the proposed method successfully estimates the location of the vehicle.

1. 서 론

최근 무인이동 플랫폼 또는 자율이동 로봇의 위치 추정에 대한 연구에서는 비전 (vision) 기술을 이용한 방법들이 제안되고 있다[1,2,3]. 본 연구에서도 3차원 등록 (registration) 기술을 사용하여 무인 이동 플랫폼의 위치를 추정하고자 한다. 3차원 등록기술은 센서를 사용하여 무인이동플랫폼의 주변 환경에 대한 3차원 정보를 획득하고 이를 디지털 지형모델(Digital Surface Model, DSM)에 정합하는 기술을 말한다. 3차원 등록을 위해서는 센서에서 획득한 데이터를 DSM에 초기정합하고 초기오차를 최소화하는 방법으로 진행한다. 3차원 등록이 완료되면 이동플랫폼의 현재 위치를 DSM의 좌표계를 기준으로 결정된다[6,7].

본 연구에서는 이동 플랫폼에 장착된 전방향 거리 센서를 이용하여 3차원 정보를 획득하고 이를 DSM에 등록하여 플랫폼의 위치추정을 구현한다. 실험은 대전 지역에서 플랫폼이 주행하면서 획득한 3개의 주행경로에 대한 3차원 데이터를 이용하였다. 로봇의 현재위치를 Ground truth와 비교하여 정확도를 분석하였다.

2. 전방향 센서를 이용한 3차원 데이터 획득

본 연구에서는 3차원 정보를 획득하기 위해 미국 벨로다인 (Belodyne)사에서 개발한 HDL-64ES2를 사용한다. HDL-64ES2는 64개의 레이저 발생기와 검출기를 이용하여 수평기준으로 +2도에서 -24.8도까지 각도에 대한 3차원 거리를 64개의 라인으로 검출한다. 센서는 초당 5~15 프레임의 속도로 회전하며 64라인의 360도

정보를 획득한다. 표 1과 그림 1은 각각 센서의 사양과 외형을 보여주고 있다.

표 1 벨로다인 HDL-64ES2의 사양

센서	<ul style="list-style-type: none"> - 64개의 레이저발생기 및 검출기 - 360도 데이터획득 - 0.09도의 데이터 획득 분해능 - 26.8도의 수직 획득각도 - 5~15Hz 획득 속도 - 최대 검출 거리 : 120m
레이저	<ul style="list-style-type: none"> - 905nm 레이저 광장대 - 5 nsec의 레이저 펄스 발생 - 4x16의 레이저 발생기

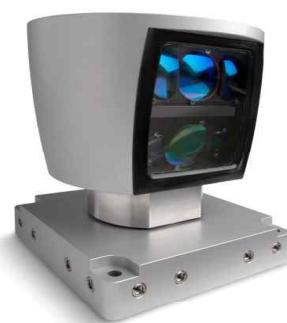


그림 1. 벨로다인 HDL-64E S2

거리를 측정할 수 있는 64개의 레이저 검출기는 센서의 중심이 지상 2.08m 높이에 장착된 경우, 최소 4.5m에서 최대 120m까지의 거리 측정 성능을 가지고 있다. 이때 0번 검출기는 센서에서 가장 멀리 떨어진 곳, 그리고 63번 검출기는 가장 가까운 곳의 3차원 정보를 획득한다. 하나의 검출기는 레이저 빛이 물체에 투사되고 반사되어 돌아오는 시간을 기반으로 거리를 측정하므로 한 개의 3차원 점 (point) 센서로 간주할 수 있다. 전방

향에 대한 거리 측정을 위하여 센서는 일정한 속도로 연속 회전하며 하나의 검출기에서 360도 방향으로 획득한 3차원 정보는 원형의 형태를 이룬다. 따라서 360도 전방향에 대하여 64개의 동심원 형태로 3차원 정보가 구성된다. 본 논문에서는 이를 한 개의 프레임(frame)으로 간주하였다. 한 프레임은 최대 133,312개의 점 데이터로 구성된다.

벨로다인 센서에서 획득한 각 3차원 점은 센서 좌표계를 기준으로 3차원 좌표뿐만 아니라 획득 각도 및 라인번호를 가지고 있다. 따라서 한 개의 점은 (ϕ, l, X, Y, Z) 로 표현할 수 있다. 여기서 ϕ 는 그림 2와 같이 센서의 Z축에 대한 회전각을 표현하며 다음 식과 같다.

$$\phi = \tan^{-1}\left(\frac{y}{x}\right) \quad (1)$$

라인번호는 64개 레이저 검출기의 번호이며 센서에서 가장 먼 곳에서 가까운 곳으로 0에서 63까지의 번호를 가진다.

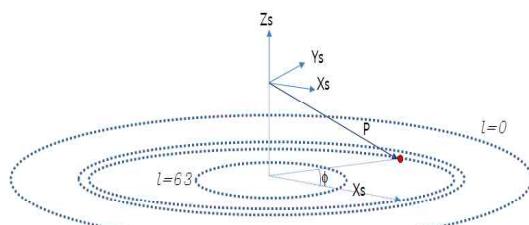


그림 2. 벨로다인 센서에서 획득한 3차원 점 P

3. 월드모델의 전처리 및 자료구조

가. 전처리

측정 각도 내에서 벨로다인 센서는 64개의 레이저 검출기가 선형적으로 거리를 측정하므로 그림 3(a)와 같이 근거리에서는 춤춤하게, 그리고 원거리에서는 간격이 넓게 측정된다. 따라서 센서로부터 가까운 거리에서 획득한 3차원 정보는 밀도가 매우 높다. 이렇게 밀도 높은 근거리 3차원 정보를 모두 등록기술에 적용하는 것은 연산 부담이 클 뿐만 아니라 효율성 또한 떨어진다. 따라서 본 논문에서는 1) 이동 플랫폼이 주행하는 환경이 주로 도로이며 센서를 중심으로 근거리에는 유효 정보가 적다는 점, 2) 이동 플랫폼 주변의 지형에서 고도가 일정 이상인 지형과 지물은 3차원 특징 정보가 충분하다는 점에 착안하여 다음과 같이 불필요한 정보는 삭제하였다.

따라서 3차원 월드모델의 거리가 20m 이하인 경우는 초기에 삭제하였다. 그러나 월드모델의 거리가 20m 이내이더라도 높이 정보가 -1.6m 이상인 경우는 3차원 특징을 가지고 있다고 판단하여 삭제하지 않았다.

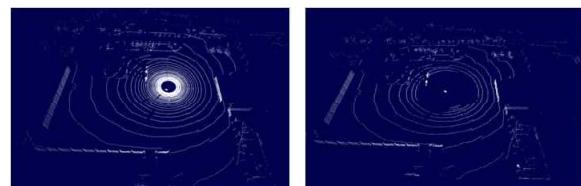


그림 3. (a) 센서에서 획득한 월드모델 (b) 전처리 후

나. 자료구조

앞서 설명한 바와 같이 월드모델의 한 점은 좌표값 (X, Y, Z) 와 회전각도 및 라인번호 (ϕ, l) 로 표현된다. 본 논문에서는 각 점의 각도와 라인번호를 $l = (0, 63)$, $\phi = (0, 1799)$ 로 양자화 하여 2차원 인덱스를 획득한 뒤 64×1800 의 영상화 된 배열에 좌표값 (X, Y, Z) 를 저장하였다. 여기서 회전각도는 360도를 0.2로 나누어 계산한 것으로 0.2도의 분해도가 3차원 등록에 충분하다는 판단에 근거한 것이다. 점 P의 3차원 좌표가 (X, Y, Z) 일 때 수평 각도의 인덱스 값은 아래와 같이 적용하였다.

$$\phi = (\tan^{-1}\left(\frac{Y}{X}\right) \times 180/\pi + 180) \times 5.0 \quad (2)$$

획득된 월드모델의 각 점들은 위의 식에 따라 수평각도의 인덱스가 정해지고 해당하는 메모리 공간으로 저장된다.

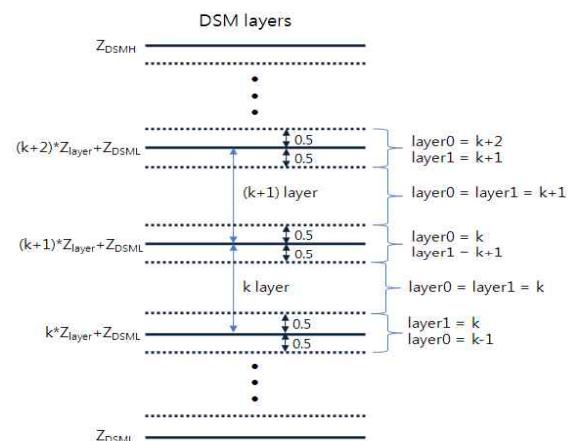


그림 4. DSM 계층에서 두 탐색 계층의 선택 방법

4. 월드모델과 DSM의 등록

DSM과 월드모델의 등록은 두 모델 사이의 일치점을 탐색하는 과정이 필요하며 탐색 방법에 따라 특징 또는 비특징 기법으로 나눌 수 있다. 위치 추정의 초기오차가 비교적 적은 경우에는 모델의 기하 특성을 사용하여 개략적인 일치점을 정하고 이 과정을 반복하여 일치점을 수렴시키는 비특징기반 등록 방법이 효과적이다. 본 논문에서는 비특징기반 등록 방법으로 널리 알려진 ICP를 사용하여 DSM과 월드모델을 등록하였다[4,5].

가. DSM 계층화를 이용한 ICP 속도 향상

ICP를 이용한 일치점을 탐색은 월드모델의 모든 점

에 대하여 DSM의 가장 가까운 점을 찾는 문제로 생각해 볼 수 있다. 월드모델의 한 점과 가장 가까운 3차원 점을 대용량의 DSM에서 탐색하는 과정은 k-d 트리 구조를 사용하더라도 시간이 많이 소요되는 작업이다. 따라서 본 논문에서는 DSM을 계층적으로 분할하여 탐색 시간을 줄이는 방법을 제안한다.

월드모델의 한 점을 $P_w = (X_w, Y_w, Z_w)$ 라 하자. 이 때 ICP를 적용하기 위한 DSM 계층은 아래 수식과 같이 2개의 계층, layer0와 layer1으로 결정한다.

$$\begin{aligned} \text{layer0} &= \lfloor (Z_w - Z_{DSML} + 0.5) / Z_{layer} \rfloor \\ \text{layer1} &= \lfloor (Z_w - Z_{DSML} - 0.5) / Z_{layer} \rfloor \end{aligned} \quad (3)$$

탐색 계층의 결정은 아래 그림 4에서 좀 더 자세하게 설명하고 있다. 위 식 (3)의 결과는 현재 점 P_w 의 고도 값에 따라 두 개의 계층을 정한다. 이때 Z_w 의 값이 하나의 계층의 중앙부근에 위치하면 하나의 계층만 선택 한다. 즉, layer0와 layer1은 같은 값으로 정해진다. 그러나 Z_w 의 값이 계층의 경계에서 $+/- 0.5$ 의 고도 차이만 있으면 인접한 현재 P_w 가 속한 계층과 바로 인접한 계층을 선택하게 된다.

Z_w 의 값이 계층의 경계에서 $+/- 0.5$ 의 차이만 있다는 것은 P_w 가 속한 현재의 계층이외에 다른 계층에 있는 점들 중에서 근접점이 있을 수 있으므로 두 개의 계층에서 근접점을 탐색하였다. 근접점의 탐색은 주어진 점 P_w 에 대하여 두 개의 DSM 계층을 정하고 각 계층에서 미리 생성된 k-d 트리를 이용하여 근접점을 각각 탐색한 다음 두 근접점중 가장 가까운 점을 최종적으로 선택한다.

나. 등록 오차 보완

이동 플랫폼의 현재 위치 인식은 센서에서 획득한 전방향 월드모델과 DSM의 등록 결과로 알 수 있다. 플랫폼의 초기위치가 주어졌다고 가정할 때, 플랫폼의 위치 변화 $T = [R|t]$ 는 앞서 설명한 DSM의 계층적 탐색을 이용하여 알 수 있다. 그러나 초기 오차가 크거나 근접점 탐색이 실패할 경우 변환 행렬의 계산에 오차가 발생하며 이는 플랫폼의 잘못된 위치 추정으로 이어질 수 있다. 또한 잘못된 초기 위치를 기반으로 다음 프레임(월드모델)을 등록하는 경우 오차가 더욱 커질 수 있다. 이러한 점을 보완하기 위하여 본 논문에서는 월드모델과 DSM의 등록 결과에 연속적으로 획득된 월드모델의 등록 정보를 추가하여 이동플랫폼의 위치를 추정하는 것을 제안한다.

우선 이전의 프레임에 대한 위치추정을 완료하였다고 가정하자. 현재 획득된 센서정보를 사용하여 이동 플랫폼의 위치를 추정하는 것이 목적이다. 이전 프레임(n-1)에 대한 현재 프레임(n)의 이동 및 회전 변환을 $T_{n,n-1}$ 이

라고 하자. 그리고 월드모델과 DSM의 등록의 결과로 얻은 변환을 T_{wD} , 월드모델 사이의 변환을 T_{wp} 라 하자. 이때 두 가지의 등록 결과를 합성하는 방법은 그림 5(a)와 같이 가중치를 적용하는 것이 일반적이며 이 경우 최종 변환은 다음 식 (4)와 같다.

$$T_{n,n-1} = k_{wp} T_{wp} + k_{wD} T_{wD} \quad (4)$$

여기서 k_{wD} 와 k_{wp} 는 각각의 변환에 대한 가중치이다. 이와 같은 방법은 두 등록의 결과 중 최소 하나의 결과가 이상적인 결과에 가깝고 해당하는 변환의 가중치가 높으면 좋은 결과를 얻을 수 있다. 하지만 두 등록의 결과가 오차를 가지고 있을 경우에는 가중치를 이용한 평균을 구하여도 오차를 줄이지는 못하는 단점이 있다.

그림 5(b)의 경우는 본 논문에서 적용한 다른 접근법을 보여준다. 이는 월드모델의 등록을 우선 실시하고 직후에 월드모델과 DSM의 등록을 한번 더 진행한 것으로 월드모델 사이의 등록 결과가 이상적인 등록에 가까울수록 현재 플랫폼의 위치추정은 정확한 결과를 얻게 된다. 다시 말해, 월드모델 사이를 등록하여 플랫폼의 위치를 임시로 추정한 뒤 월드모델과 DSM의 등록을 실시하면 초기 오차가 작은 위치에서 등록을 진행하게 됨으로써 이상적인 위치를 추정할 수 있게 된다.

다. 3차원 등록의 추가 제약조건

일반적인 경우 ICP 알고리즘으로 일치점을 결정할 때 점군을 선형 샘플링한다. 하지만 모델에서 수평면에 가까운 도로나 운동장 보다는 기울기가 있는 지형이나 건물에 속한 3차원 점들 주변의 정보가 등록에 유용하다. 이를 고려하여 등록하고자 하는 두 모델 사이 일치점에서 각 법선 벡터의 Z성분 크기가 0.7 이상인 경우는 수평인 지표면으로 간주하여 샘플링에서 제외시켰다. 또한 연속된 월드모델 사이의 일치점들은 법선 성분이 매우 유사한 경우가 많다. 그래서 두 법선의 내적이 0.8 이하인 경우에는 일치점으로 간주하지 않고 역시 샘플링에서 제외시켰다.

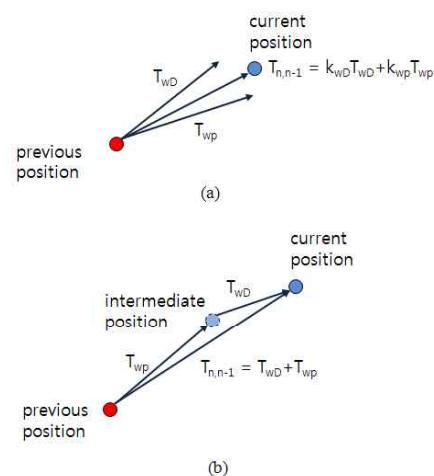


그림 5. 월드모델과 DSM 등록의 접근법

5. 실험결과

실험은 대전지역에 있는 실험 장소에서 3개의 주행경로 및 2개의 정지 상태에 대하여 실시하였다. 실험에 사용한 컴퓨터는 인텔 Core2Duo 3.0GHz 이고 2.0GB의 메모리를 사용하였다.

그림 6에서 8까지는 3개의 주행 경로에 대한 이동플랫폼의 (X,Y)위치를 ground truth와 함께 출력하였다. 녹색의 추정결과가 ground truth와 일치함을 보여주고 있다. 3번째 경로실험의 마지막 부분에서는 추정이 실패하였다.

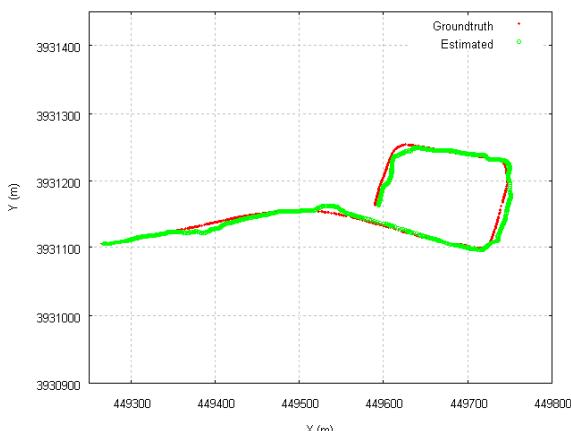


그림 6 경로1의 실험결과

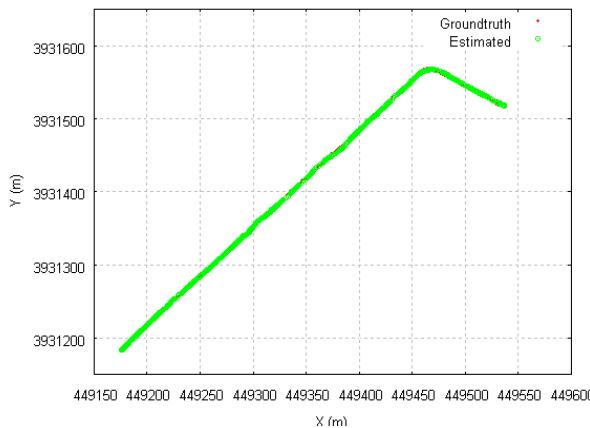


그림 7 경로2의 실험결과

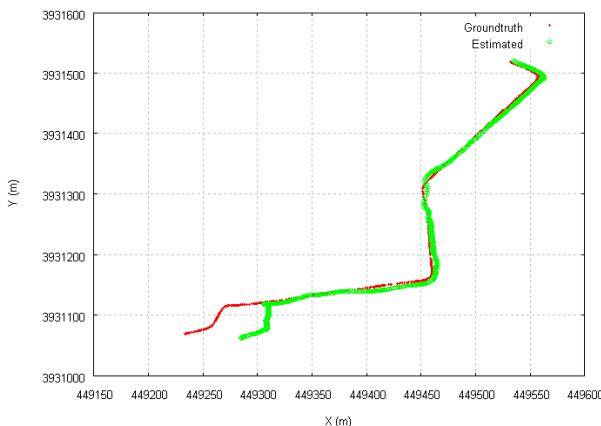


그림 8 경로3의 실험결과

표 2 주행실험 결과분석

경로번호	전체frame수	성공프레임수
경로1	970	970
경로2	597	597
경로3	650	477

6. 결론

본 연구에서는 벨로다인 3차원 센서와 DSM을 이용한 이동 플랫폼의 위치추정에 대하여 기술하였다. 지상에서 2.08m높이에 설치된 센서로부터 360도 전방향의 3 차원 지형 및 지물 정보를 획득하고 이를 DSM에 등록함으로써 플랫폼의 위치를 추정하였다. 연속된 월드모델을 먼저 정합하여 임시로 위치를 추정하고 이를 기반으로 DSM과 월드모델을 등록하여 최종 위치를 판단하였다. 3차원 등록은 k-d 트리리를 이용한 ICP를 이용하였다. 연속 월드모델의 등록과 DSM의 등록을 분리함으로써 비교적 빠른 3차원 등록을 구현할 수 있었다.

현재 구현한 위치추정 알고리즘은 약 200ms/frame의 속도를 보이고 있다. 실제 운용 가능한 알고리즘이 되기 위해서는 약 100ms/frame의 속도로 개선이 필요하다. 그리고 위치 추정에 있어 단순한 선형 필터가 아닌 칼만 필터 등을 사용함으로써 오차를 줄이는 방법을 추가하여야 할 것으로 판단된다.

참고문헌

- [1] M. Agrawal, K. Konolige, and R. C. Bolles, "Localization and Mapping for Autonomous Navigation in Outdoor Terrains : A Stereo Vision Approach," IEEE Workshop on Applications of Computer Vision, pp. 7-12, 2007.
- [2] R. Katz, N. Melkumyan, J. Guivant, J. Nieto, and E. Nebot, "3D Sensing Framework for Outdoor Navigation," Proceedings of Australasian Conference on Robotics and Automation, 2005.
- [3] R. Madhavan, T. Hong, and E. Messina, "Temporal Range Registration for Unmanned Ground and Aerial Vehicles," Journal of Intelligent and Robotic Systems, Vol. 44, No. 1, pp. 47-69, 2005.
- [4] S. Rusinkiewicz, S and M. Levoy, "Efficient Variants of the ICP Algorithm," Proceedings of the third International Conference on 3-D Digital Imaging and Modeling, pp. 145-152, 2001.
- [5] P. Besl and N. McKay, "A Method for Registration of 3D Shapes", IEEE Trans. PAMI, Vol. 14, No. 2, pp. 239-256, 1992.
- [6] N. Vandapel and M. Hebert, "3D Rover Localization in Airborne Ladar Data," International Symposium on Experimental Robotics, July, 2002.
- [7] N. Vandapel, R. Raghavendra, R. Donamukkala, and M. Hebert, "Unmanned Ground Vehicle Navigation Using Aerial Ladar Data," The International Journal of Robotics Research, Vol. 25, , No. 1, pp. 31-51, 2006.