

논문 2011-48CI-6-14

# 전방향 거리 센서의 균일 원호길이 샘플링을 이용한 무인 이동차량의 실시간 위치 추정

( Real-time Localization of An UGV based on Uniform Arc Length  
Sampling of A 360 Degree Range Sensor )

박 순 용\*, 최 성 인\*\*

( Soon-Yong Park and Sung-In Choi )

## 요 약

본 논문에서는 무인 지상 차량의 (Unmanned Ground Vehicle, UGV)의 위치 추정을 위한 컴퓨터 비전 기술을 제안한다. 제안하는 방법은 연속적으로 획득되는 360도 거리 정보(range data)와 디지털 수치모델(Digital Surface Model, 이하 DSM)의 3차원 등록(3-D registration) 방법에 기반하고 있다. 많은 수의 3차원 점군(point clouds) 정보를 가지고 있는 거리 정보의 연속적 3차원 등록은 상당한 수행 시간을 필요로 한다. 실시간 위치 추정을 위해 우리는 투영 기반의 등록 방법과 Uniform Arc Length Sampling(이하 UALS) 방법을 제안한다. UALS는 거리영상에서의 GSD(ground sample distance)를 균일하게 유지하면서 동시에 3차원 샘플 포인트의 수를 줄일 수 있는 장점을 가지고 있다. 또한 투영 기반 등록 기술은 3차원 대응점의 탐색 시간을 감소시킨다. 두 개의 실제 항법 경로를 이용한 실험을 통하여 제안하는 방법의 성능을 검증하였다. 3차원 점군의 다양한 샘플링에 대하여 제안하는 기술의 속도 및 정합 성능을 기존 방법과 비교하였다.

## Abstract

We propose an automatic localization technique based on Uniform Arc Length Sampling (UALS) of 360 degree range sensor data. The proposed method samples 3D points from dense a point-cloud which is acquired by the sensor, registers the sampled points to a digital surface model(DSM) in real-time, and determines the location of an Unmanned Ground Vehicle(UGV). To reduce the sampling and registration time of a sequence of dense range data, 3D range points are sampled uniformly in terms of ground sample distance. Using the proposed method, we can reduce the number of 3D points while maintaining their uniformity over range data. We compare the registration speed and accuracy of the proposed method with a conventional sample method. Through several experiments by changing the number of sampling points, we analyze the speed and accuracy of the proposed method.

**Keywords :** Localization, 3D Sensor, Registration, Unmanned vehicle.

## I. 서 론

3차원 등록(Registration)은 컴퓨터 비전 기술 중 하나로 서로 다른 좌표계(coordinate system)를 가지는 다시점(multi-view) 거리 영상(depth image)을 정렬(alignment)하는 방법이다. 서로 다른 좌표계에서 획득된 거리 영상은 각각 독립적인 좌표계를 가지고 있어 복원하고자 하는 대상물의 3차원 모델 정보를 표현할

\* 정회원-교신저자, 경북대학교 IT대학 컴퓨터학부  
(School of Computer Science and Engineering,  
Kyungpook National University)

\*\* 학생회원, 경북대학교 대학원 전자전기컴퓨터학부  
(Graduate School of Electrical Engineering and  
Computer Science, Kyungpook National University)

※ 본 연구는 한국과학기술원 국방무인화기기술 특화연구 센터를 통한 방위사업청과 국방과학연구소 연구비 지원으로 수행되었습니다.

접수일자: 2011년8월17일, 수정완료일: 2011년9월7일

수 없다<sup>[1]</sup>. 따라서 하나의 공통된 좌표계로 다시점 거리 영상을 등록하여야 하는데 이를 3차원 등록이라 한다<sup>[2]</sup>.

3차원 등록 기술은 3차원 모델 복원, 3차원 로봇 비전 등 다양한 분야에 응용될 수 있으며 많은 기술들이 소개되었다. 최근 로봇 관련 연구에서 3차원 등록 기술은 3차원 거리 센서로 획득한 거리 영상을 이용하여 무인 로봇이나 차량의 위치 추정에 적용되고 있다<sup>[3]</sup>. 특히 무인 로봇이나 무인 차량의 위치 추정은 자율 주행에 필수적인 기술로 군사적 목적의 로봇 및 차량의 개발에 필수적인 기술이라 할 수 있다.

3차원 등록 기술이 무인 차량의 위치인식에 활용될 수 있는 예를 그림 1에서 보이고 있다. 그림에서 무인 차량에 장착된 3차원 센서는 차량 주위의 3차원 형상을 획득할 수 있는데, 획득된 형상은 센서 좌표계를 기준으로 3차원 정보  $P_L$ 를 표현한다. 그리고 차량이 주행하고자 하는 주변 지형의 지도(map) 정보가 전역적인 3차원 좌표로 주어진다 가정하자. 센서좌표계로 표현된 차량 주변의 지형 정보를 전역좌표계 기준인  $P_G$ 로 표현하기 위해서는 3차원 변환  $T$ 를 알 수 있어야 한다. 즉  $P_G$ 는 전역 좌표계에 대한 차량의 위치로 볼 수 있고 지역좌표계에서 전역좌표계로의 변환 정보를 알 수 있다면 무인 차량의 위치 정보를 알 수 있다.

두 좌표계간의 변환 관계  $T$ 를 구하기 위해서는 현재 주행하는 환경의 3차원 센서 정보와 전역 좌표계로 표현되는 지도 정보 사이의 3차원 변환관계를 알아야 하므로 3차원 등록의 문제를 풀어야 한다. 일반적으로 이러한 문제는 3차원과 3차원의 정합(matching) 문제라 할 수 있으며 정확한 결과를 구하기 쉽지 않다<sup>[4]</sup>.

일반적으로 이러한 3차원 정합 문제를 풀기 위해서는

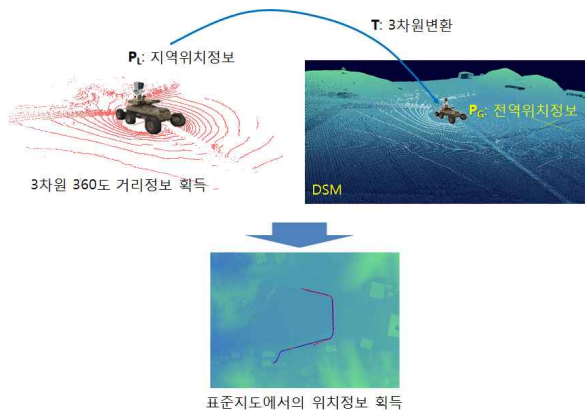


그림 1. 3차원 등록을 이용한 무인자동차의 위치추정  
Fig. 1. Localization of an unmanned ground vehicle using 3D registration.

시간이 많이 걸리기 때문에 초기 위치 정보를 이용하는 경우가 많이 있다<sup>[5]</sup>. 특히 군사적 목적의 차량의 경우 초기 위치 정보를 GPS나 INS 센서를 통하여 개략적으로 추정이 가능하다. 따라서, 지역적인 센서 정보와 전역적인 지도 간의 변환 관계를 정확하게 구하기 위해서는 초기 위치 정보를 기반으로 이를 정제(refinement)하는 3차원 등록 기술이 필요하다.

3차원 등록의 일반적인 접근은 ICP (Iterative Closest Point) 알고리즘<sup>[6]</sup>을 이용하는 것이다. ICP는 로봇의 위치 추정 이외에도 3차원 복원 및 모델링, 증강현실 (augmented reality) 등 많은 분야에 사용되고 있는 기술이다<sup>[7]</sup>. ICP와 관련된 기존 기술은 너무 많은 예가 있으므로 본 절에서는 ICP 기술이 로봇의 위치 추정에 적용된 예를 주로 살펴보고자 한다. Madhavan R. 등<sup>[8]</sup>은 연속적인 3차원 거리 데이터를 쌍정합(pair-wise registration) 방법을 이용하여 로봇의 자세를 결정하도록 3차원 등록 기술을 적용하였다. 이들은 수정된 ICP 알고리즘을 정합된 외치점을 제거하는 방법으로 적용하였다. Tribel 등<sup>[9]</sup>은 다층 지형 지도를 이용하는 방법을 소개하였는데, 이 방법은 몇 개의 물체 종류를 표면 패치로 분류하는 방법을 사용하였다. Levinson 등<sup>[10]</sup>은 로봇 주행을 위하여 도시 환경에 대한 디지털 지도를 이용하였다. 이 때, 지역 거리 데이터와 지도 간의 정합을 위해 파티클 필터를 이용하였다.

특히 소수의 연구에서는 전방향 거리 데이터를 획득하기 위해 360도 거리 센서를 사용하였다. Himmelsbach 등<sup>[11]</sup>은 360도 거리 센서를 이용하여 획득한 거리 영상을 분할, 분류, 및 추적하였다. 이들은 전방향 센서 정보를 이용하여 점유그리드 (occupancy grid)를 생성하여 장애물을 탐지할 수 있도록 하였다. Kummerle 등<sup>[12]</sup>은 360도 거리 센서를 포함한 다양한 항법 센서를 무인 로봇에 장착하여 자율 주행이 가능하도록 하였다. Park 등<sup>[13]</sup>은 360도 거리 영상과 디지털 지형 모델 간에 두 단계의 과정을 거치는 새로운 정합 방법을 제안하였다. Park 등<sup>[14]</sup>은 또한 거리영상의 정합을 고속으로 구현하기 위하여 3차원 점군의 새로운 샘플링 기술을 제안하였다.

서로 다른 좌표계를 가지는 시스템으로부터 획득된 3차원 지도를 정합하기 위해서는 3차원 형상 또는 지도 사이의 유효한 대응 관계가 일정 수 이상이 되어야 한다<sup>[1]</sup>. 그러나 일반적으로 사용하는 3차원 센서는 많은 수의 점군 (point cloud)정보를 가지고 있고 특히

360도 방향의 거리 정보를 획득하기 위한 센서의 경우 상대적으로 더 많은 3차원 정보를 가지고 있기 때문에 3차원 등록을 위해서는 그에 상응한 많은 수행 시간이 필요하다.

본 논문에서는 전방향 센서에서 획득한 지역적인(local) 3차원 지형 정보를 표준 좌표계로 표현되는 전역적인(global) 디지털 수치모델(DSM)로 빠르게 등록하여 무인 로봇의 위치 추정을 실시간으로 구현하는 기술을 제안하였다. 센서 정보와 DSM의 등록을 위하여 기존의 기술과는 달리 균등한 지상샘플거리(ground sample distance) 방법을 통해 3차원 거리 정보 간의 대응 관계의 수를 줄이고 따라서 3차원 위치 인식의 속도를 실시간으로 구현하였다. 실험 결과를 통해 제안하는 방법이 15Hz 속도로 로봇의 위치를 추정할 수 있음을 보여준다.

## II. 거리 정보의 형식과 샘플링

### 1. 거리 정보의 형식

본 논문에서 사용한 거리 센서는 Velodyne사의 HDL-64ES2 LIDAR 센서로 무인 이동 차량의 중앙 상단에 장착하였다. 이 센서는 64쌍의 레이저 방출기와 검출기를 가지고 있으며 이들 레이저를 10Hz의 속도로 회전하여 360도 거리 정보를 획득한다. 센서는 차량의 높이를 포함하여 지상으로부터 2.081m의 높이에 장착되었다. 그림 2에서와 같이 센서의 수직 시야각(vertical field of view)은 26.8도이며, 수평 방향을 기준으로 윗 방향으로 +2도, 그리고 아래 방향으로 -24.8도의 시야각을 가진다. 센서가 획득할 수 있는 최소 거리는 4.270m이며 최대 거리는 150m이다. 하지만 실제 야외 환경에서는 100m이상의 물체에 대해서는 센서의 거리 정밀도가 떨어지기 때문에 100m 이하의 데이터만을 실험에 사용하였다.

센서에 내장된 각 레이저 검출기는 단일 회전으로 최대 2048개의 3차원 포인트를 획득한다. 따라서 전체 64

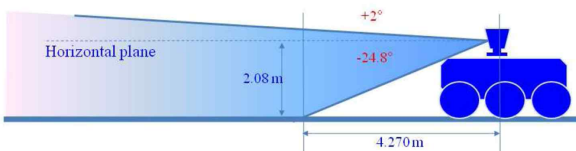


그림 2. 360도 전방향 센서의 탑재 위치 및 시야각  
Fig. 2. Sensing angle of a 360-degree range sensor.

개의 레이저는 그림 3에 보이는 바와 같이 센서 좌표계에 대하여 3차원 포인트 집합들을 획득한다. 센서 좌표계를 기준으로 3차원 점  $P$ 를  $(X,Y,Z)$ 로 표현할 수 있으며 센서의 중심은  $(0,0,0)$ 이 된다. 한 개의 레이저는 센서의 회전에 의해 2048개의 점으로 구성된 원(circle) 형태의 3차원 데이터를 획득하며 따라서 64개의 레이저에 의하여 64개의 동심원을 가지는 3차원 데이터가 한 장의 지역기반 3차원 거리 정보로 표현된다. 3차원 데이터의 각 점은 레이저의 번호( $L$ )와 회전각( $\phi$ )에 따라 3차원 좌표값의 접근이 가능하다. 레이저 번호는 가장 원거리부터 근거리의 순서대로 매겨지며, 회전각은 센서의  $X$ - $Y$  평면에 대한 회전량으로 표현된다.

센서에서 획득된 3차원 정보의 고속처리를 위해서는 정형화된 정보 형식이 필요하다. 한 장의 3차원 센서 정보를 보면 레이저 번호는 항상 0-63으로 일정하지만 회전방향의 점의 개수는 일정하지 않다. 이는 센서의 1회전 동안 레이저 반사가 발생하지 않는 곳이 존재하므로 3차원 점의 개수는 항상 2048보다 적기 때문이다. 따라서 3차원 센서 정보를 그대로 사용하지 않고 영상 프레임(frame)형식을 응용하여 3차원 정보를 변환하였다<sup>[13]</sup>.

센서의 3차원 데이터를 영상화하기 위해 우리는 점군 데이터를 2.5차원의 깊이 지도로 변환하는데, 이 깊

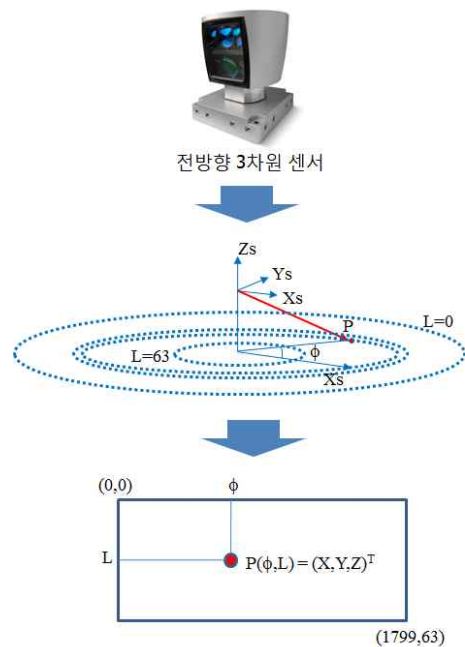


그림 3. 360도 센서 정보의 거리 프레임 변환  
Fig. 3. Conversion of 360 degree sensor data to range frame.

이 지도를 “거리 프레임”이라고 한다. 한 프레임의 크기는 64×1800의 해상도를 가지며, 행방향의 색인 L과 열방향의 색인  $\Phi$ 는 레이저 수와 수평 회전 각도에 따라 상대적으로 대응된다. 열방향의 색인에 의하면, 360도 거리 데이터는 해상도 0.2도로 양자화된다. 센서 정보의 형식 변환에 대한 자세한 내용은 참고문헌 [13]을 참고한다.

2. 균일한 원호길이 샘플링

이번 절에서는 3차원 센서정보를 효율적으로 샘플링하는 방법을 제안한다. 제안된 방법은 3차원 등록의 성능을 저하시키지 않으면서 무인 차량의 위치 추정을 매우 빠르게 구현할 수 있는 장점을 가지고 있다. 제안하는 방법은 균일 원호길이 샘플링(Uniform Arc Length Sampling, 이하 UALS)이라 한다. 기존의 3차원 등록에서 일반적으로 사용되는 균일 점 샘플링(Uniform Point Sampling, 이하 UPS) 방법은 원래의 3차원 점군 데이터 중에서 일정한 점의 개수마다 등록에 사용할 점을 균일하게 샘플링한다<sup>[13-14]</sup>. 반면 제안 방법은 본 연구에 사용된 Velodyne 센서의 특성을 고려한 샘플링 방법을 사용하였다. 센서의 각 레이저는 1회전 당 거의 동일한 개수의 3차원 점들을 획득하지만 근거리의 레이저의 경우 센서의 회전 방향에 대한 지상샘플 길이(ground sample distance)가 짧아져 단위길이 당 획득하는 점들의 밀도가 매우 높아진다. 따라서 근거리의 레이저에 대하여 기존의 샘플링은 여전히 높은 밀도의 3차원 점들의 샘플을 가지게 되며 3차원 등록에 실제 필요한 점의 수보다 필요 이상으로 많은 수의 점들이 획득될 수 있다.

본 논문에서는 센서가 획득하는 무인 차량 주변의 3차원 지형에 대한 지상샘플 길이가 균일하도록 새로운 샘플링 기술을 제안하였다. 제안된 샘플링 방법은 각 레이저의 회전 방향에 대한 샘플링 간격  $\Phi_s(L)$ 를 다음과 같이 구하고자 한다.  $\Phi_s(L)$ 은 그림 4에서 보듯이 레이저 L에 대한 샘플링 간격, 즉 샘플링된 점들 사이의 원호의 길이라 할 수 있다.

우선  $\alpha(L)$ 이 하나의 레이저 L에 대한 원주라 하자. 이는 수식 (1)과 같이 구할 수 있다. 여기서  $\theta(L)$ 은 센서 좌표계의 X-Y 수평 평면과 레이저 L의 검출 방향의 레이(ray)가 이루는 수직 방향의 각도라 하자. 레이저의 검출 방향이 수평면 보다 위쪽에 있으면  $\theta(L)$ 은 양수이고, 반대로 아래쪽에 있으면 음수가 된다. 따라서

$\alpha(L)$ 은  $\tan(90-\theta(L))$ 에 비례하게 된다. 만약  $\theta(L)$ 이 1.0도 보다 크다면,  $\alpha(L)$ 은 수식 (1)에서와 같이 상수값을 가지게 된다. 이 수식에서, h는 지상으로부터 거리 센서의 높이로 상수이며,  $d_{max}$ 는 최대 원주 크기이다. 다음으로 레이저 L의 원주 방향의 샘플링 거리  $\Phi_s(L)$ 은 수식 (2)에 제시한 바와 같이 최대 원주를  $\alpha(L)$ 로 나누어서 계산한다.

$$\alpha(L) = \begin{cases} \alpha_{max} = 2\pi d_{max} & \text{if } \theta > 1.0, \\ 2\pi h \times \tan(90 - \theta(L)) & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (1)$$

$$\Phi_s(L) = \lfloor \frac{k\alpha_{max}}{\alpha(L)} + 0.5 \rfloor \quad (2)$$

마지막으로 거리 영상 프레임의 각 레이저 L에 대하여, 우리는 3차원 포인트를 최초 점 P(0,L)로부터 i번째 점을 다음 수식 (3)과 같이 샘플링하였다.

$$P_i(L) = P(i \times \Phi_s(L), L). \quad (3)$$

그림 4(b)에서 나타난 것과 같이, 3차원 점들은 각 레이저의 센싱 거리에는 관계없이 균일한 원호 길이  $k\alpha_{max}$ 로 샘플링된다. 여기서 k는 샘플링된 포인트의 밀도를 조정하는 상수이다. 하지만, 기존의 UPS 방법에서  $\Phi_s(L)$ 은 상수가 된다. UPS 방법에서는  $\Phi_s(L)$ 의 값에 샘플링 밀도가 의존하여 이에 따라 지나치게 밀집된 형태나 드문드문한 형태로 생성된다. 이와는 달리 UALS 방법은 3차원 점들을 균일한 지상샘플거리에 의해 샘플링하게 된다.

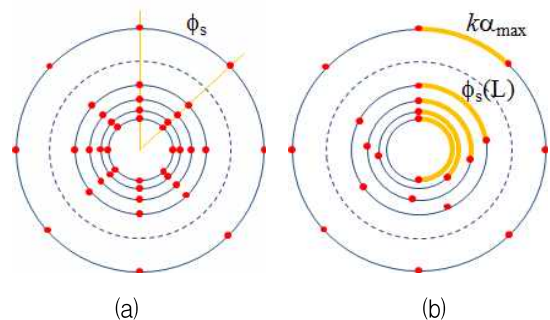


그림 4. 두 샘플링 방법의 비교 (a) UPS (B) UALS  
Fig. 4. Comparison of two sampling methods

III. 무인 차량의 위치 추정

1. 위치 추정 방법

무인 지상 차량(UGV)의 위치 추정은 그림5에 제시한 바와 같은 순서로 구현된다. 센서에서 획득된 거리 프레임의 연속된 쌍정합에 의한 지역 등록과 전역적 좌표계를 가지는 DSM과의 등록 단계를 거친다. 지역 등록은 연속된 두 개의 거리 데이터 프레임을 정렬하고 현재 거리 데이터 프레임과 초기 위치 사이의 변환 관계를 계산한다. 하지만, 3차원 등록 시에 계산되는 거리 데이터의 길이에 따라 누적 오차가 커져서 위치 추정에 오류가 발생할 수 있다. 이 문제를 해결하기 위해 전역 등록 방법을 이 후에 수행한다<sup>[13]</sup>.

2. 투영 기반 ICP

쌍정합의 지역 등록 단계에서 두 개의 3차원 거리 프레임 사이의 상관관계를 찾기 위해서는 그림 6에 제시한 것과 같이 소스(source) 프레임과 목적(destination) 프레임이 필요하다. 소스 프레임에서 3차원 포인트 P가 있다고 가정할 때, 우리는 정합될 점 Q'를 목적 프레임에서 찾아야 한다. 투영 기반 등록 방법은 이를 빠른 속도로 탐색할 수 있게 해준다.

소스 프레임이 현재 프레임(n)이고, 목적 프레임이 이전 프레임(n-1)이라고 가정하자. 이전 프레임은 참조 좌표계에 의해 이미 정렬된 상태라 가정하자. 소스 프레임의 초기 위치는 목적 프레임의 위치와 동일한  $T_{n-1,0}$ 이라 하자. 우선 현재 프레임을 센서 좌표계로 변환한다. 이는 점 P를 초기 위치 정보를 이용하여  $P' = T_{n-1,0}^{-1} P$  로 변환한다. 다음으로 P'를 2차원 포인트로 목적 프레임에 투영한다. 이 점을  $q(\phi, L)$ 라 하고 그림 6에서와 같이 q의 탐색 공간 내에 있는 목적 프레임의 점들에서 3차원 거리를 계산하여 P에 가장 가까운 Q를 찾을 수 있다. 두 개의 거리 프레임이 충분히 가깝다고 판단할 수 있을 때까지, 탐색 공간을 그림 6에서

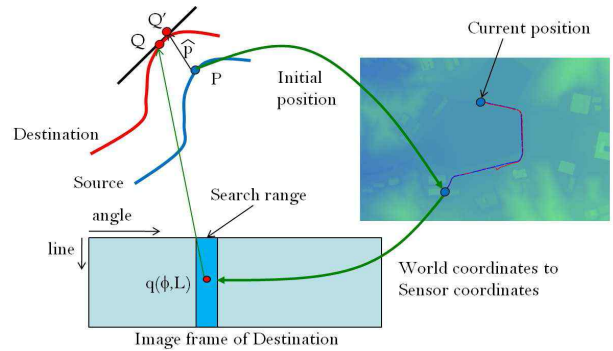


그림 6. 투영기반 쌍정합 지역등록  
Fig. 6. Projection-based pairwise registration scheme.

나타난 것처럼 제한시킨다. 실제 실험에서, 우리는 각도 탐색 공간을 ±15도로,  $q(\phi, L)$ 로부터 레이저 번호는 ±3으로 고정하였다.

대응점 Q'는 점 Q의 탄젠트 평면과 점 P의 법선 벡터의 교차점으로 구할 수 있다. 대응되는 수가 충분하게 구해지면, 변환 행렬  $T_{pair} = [R_{pair} | t_{pair}]$ 를 등록 오류가 최소화 되도록 정의할 수 있다. 등록 오류  $\epsilon_{pair}$ 는 수식 4를 이용하여 최소화할 수 있다.

$$\epsilon_{pair} = \sum_{k=1}^K \|Q'_k - (R_{pair} P_k + t_{pair})\|^2. \quad (4)$$

쌍정합을 이용한 지역등록을 완료한 후에, 현재 프레임의 위치는 디지털 수치모델을 이용하여 보정한다. 이때 ICP를 사용하게 되며 고도분할 방법을 이용하여 전역 등록의 속도를 향상하였다<sup>[13]</sup>.

IV. 실험 결과

1. ICP와 제안기술의 속도 및 오차 비교

제안하는 방법을 사용한 무인 차량의 위치 추정 오류

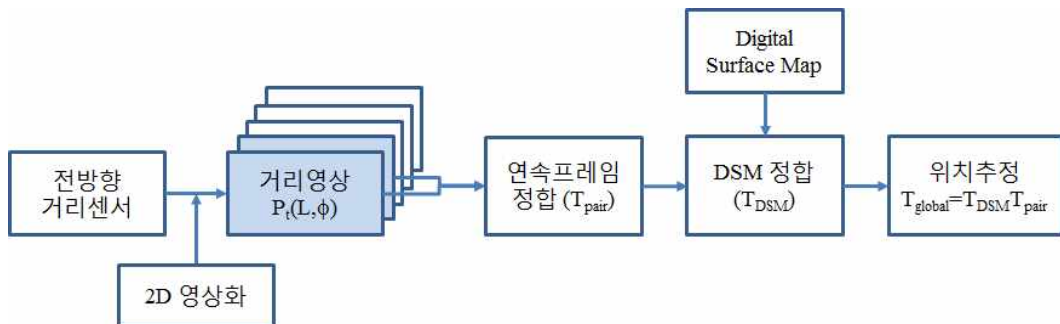
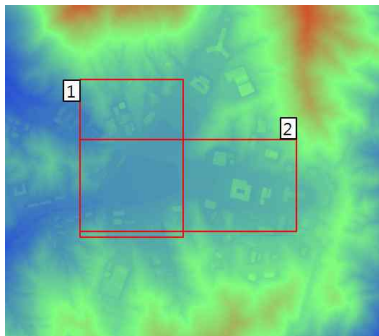


그림 5. UGV의 자율 위치추정의 순서도  
Fig. 5. Flow of autonomous localization of an UGV.



(a)



(b)

그림 7. (a) 360 전방향 센서를 사용한 UGV, (b) DSM  
 Fig. 7. (a) An UGV with 360 degree range sensor  
 (b) DSM.

표 1. 실험 경로에 대한 정보  
 Table 1. Properties of navigation paths.

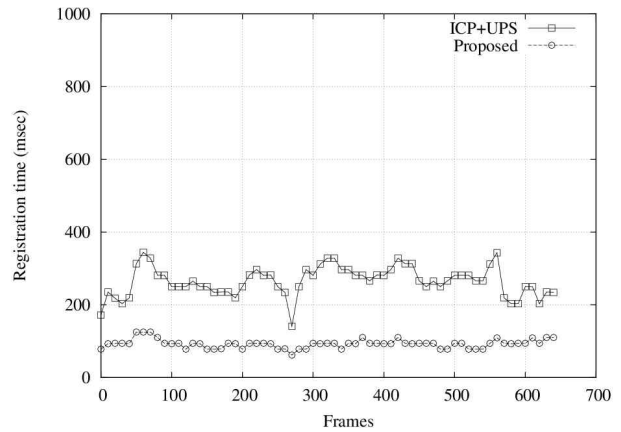
경로	경로-1	경로-2
프레임 수	650	970
DSM 해상도(pixel)	969×2713	1677×1441
DSM 정밀도 (m)	0.5	0.5

를 분석하기 위하여 군사용 무인 차량을 활용하였다. 두 개의 다른 항법 경로를 사용하여 실험을 수행하였다. 각 경로를 따라 UGV를 주행하여 전방향 3차원 거리 데이터를 획득하였다. 동시에 360도 센서의 모든 프레임에 대하여 정답값(ground truth) 위치를 기록하였다. 센서는 10Hz 속도로 회전하였다. 실험에 사용한 UGV는 그림 7(a)와 같다. 두 개의 항법 영역은 그림 7(b)에 나타내었다. 또한, 표 1에 두 주행 경로에 대한 일반적인 정보를 제시하였다.

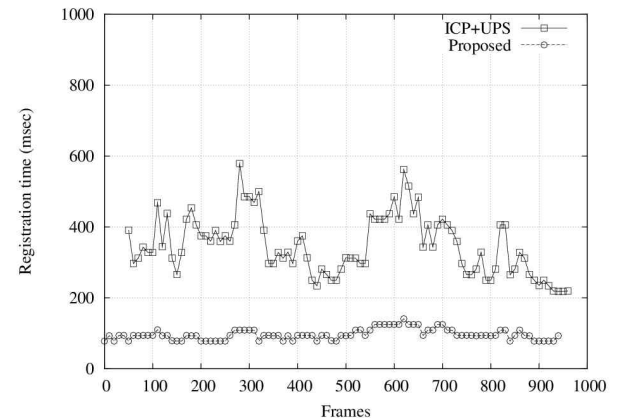
위치 추정 실험은 제안하는 방법과 ICP 알고리즘을 비교하였다. 실험에 이용한 ICP 알고리즘은 초기점은 UPS에 의해 샘플링하고, k-d 트리 탐색 알고리즘을 결합하여 사용하였다<sup>[7]</sup>. 소스 프레임과 목적 프레임 사이의 대응점은 가장 가까운 거리의 점을 탐색하여 이용하였다. 각 경로를 주행할 때, 평균 등록 오류와 수행 시

표 2. 위치추정 평균오차 및 시간  
 Table 2. Average localization error and time.

경로	추정방법	위치오차(m)	시간(msec)
경로-1	ICP+UPS	7.27	365.3
	제안방법	4.46	97.3
경로-2	ICP+UPS	6.50	273.9
	제안방법	4.63	92.4



(a)



(b)

그림 8. 거리 프레임의 계산 시간 (a) 경로-1 (b) 경로-2  
 Fig. 8. Localization time in the tested range frames (a) path-1 (b) path-2.

간을 기록하였다. 제안 방법은 3절에서 설명한 투영기반의 쌍정합 3차원 등록과 [13]에서 설명한 고도분할 방법을 사용하였다. 공정한 비교를 위해, 두 방법에서 사용된 3차원 샘플링 점들의 개수는 가능한 동일하게 하였다. 본 실험에서는 매 프레임 마다 약 500개의 3차원 점들을 사용하였다.

표 2는 두 경로의 위치추정 오차와 시간을 보여준다. 두 개의 경로에 대한 실험 결과에 의하면, 제안 방법의 위치 추정 시간은 0.1초 미만으로 10Hz 이상의 속도를

가진다. 즉, 위치 추정 속도는 기존의 ICP 방법의 3배 이상 빠르다. 위치 추정 오류 또한 기존 ICP 방법보다 작게 나타난다.

그림 8에서 제안 기술의 수행 속도를 기존의 기술과 비교하였다. 앞서 설명한 바와 같이 거의 유사한 샘플 개수(약 500개)에 대한 두 방법의 위치 추정 시간을 비교하였다. 그림에서 기존의 ICP 방법은 수행 시간의 분산이 높은 것을 볼 수 있다. 이것은 불안정한 형태로 위치 추정이 일어나고 있다고 볼 수 있다. 이에 반해, 제안하는 방법은 매우 빠르고 안정적으로 위치 추정을 수행하는 것을 알 수 있다.

2. 샘플링 방법의 비교

다음 실험은 본 논문에서 제안한 샘플링 방법인 UALS와 기존의 UPS 방법에 대하여 다양한 샘플링 조건에 대한 성능을 비교 및 분석하였다. 본 실험에서는 동일한 쌍정합과 전역정합을 사용하면서 3차원 점군을 샘플링하는 기술만을 다르게 하여 위치추정의 오차를 비교하였다. 표 3과 4를 보면 두 가지의 샘플링 방법에 대하여 다양하게 3차원 샘플수를 변경하여 결과를 얻은 것을 볼 수 있다. 모두 6가지의 경우로 샘플링 개수를

표 3. 다양한 3차원 샘플 개수에 대한 경로-1의 결과 Table 3. Results of different numbers of samples(path-1).

비교항목		실험1	실험2	실험3	실험4	실험5	실험6
샘플수	UPS	2126	1269	415	389	365	190
	UALS	912	453	148	146	121	142
위치오차 (m)	UPS	4.5	4.7	5.4	12.7	69.9	71.7
	UALS	4.8	4.6	5.5	6.2	57.5	62.2
수행시간 (msec)	UPS	296	209	118	106	91	89
	UALS	130	92	69	61	53	51

표 4. 다양한 3차원 샘플 개수에 대한 경로-2의 결과 Table 4. Results of different numbers of samples(path-2).

비교항목		실험1	실험2	실험3	실험4	실험5	실험6
샘플수	UPS	2073	2072	1549	1029	406	358
	UALS	972	482	158	158	157	156
위치오차 (m)	UPS	4.4	4.3	4.3	4.4	4.2	99.7
	UALS	4.6	4.5	5.0	5.1	5.5	6.2
수행시간 (msec)	UPS	315	294	238	185	119	100
	UALS	136	97	70	62	58	57

다르게 변경하여 위치추정 오차 및 속도를 비교하였다.

표에서 보이는 바와 같이 샘플의 수가 많은 경우에는 UPS와 UALS 모두 좋은 위치 추정을 보임을 알 수 있다. 그러나 UPS의 경우 상당한 수의 3차원 샘플점들을 이용하기 때문에 시간이 많이 걸리는 단점이 있다. UPS 방법에서 샘플수를 조금 줄이는 경우, 예를 들어 실험1보다 실험2의 샘플 수가 더 적음, 위치의 성능은 여전히 좋으나 그 수가 크게 줄어드는 경우, 예를 들어 실험6의 경우, UPS의 성능은 크게 나빠짐을 알 수 있다. 이는 경로1과 경로2에 모두 해당된다. 반면 UALS의 경우, 샘플링된 3차원 점들의 수가 줄어드는 경우도 위치 추정이 UPS보다 좋음을 알 수 있다. 또한 추정 속도도 줄어듬을 알 수 있다.

그림 9와 10에서는 6가지의 서로 다른 샘플링 실험에 대하여 경로-1과 경로-2의 위치 추정 결과를 보였

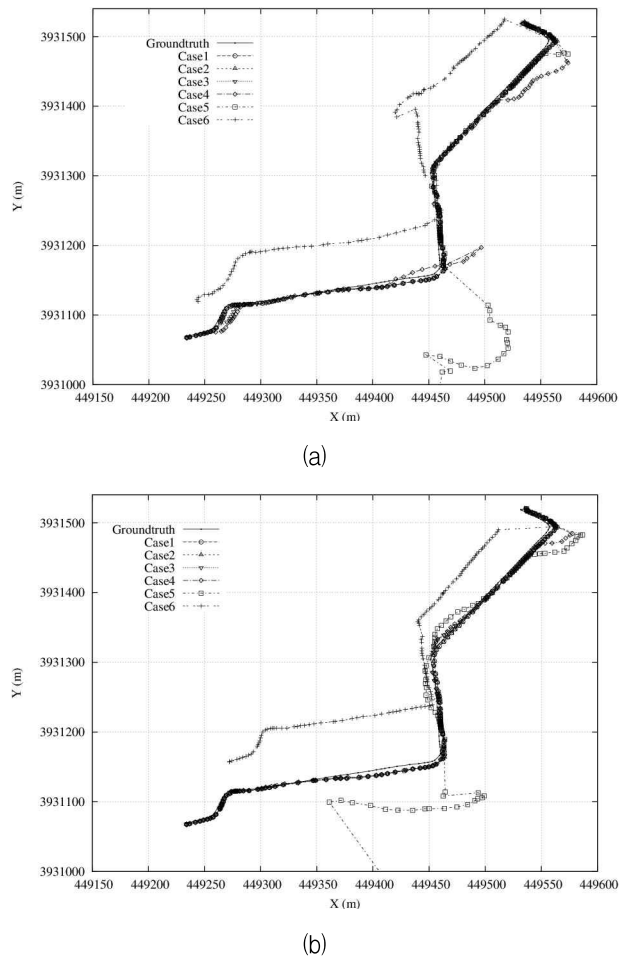
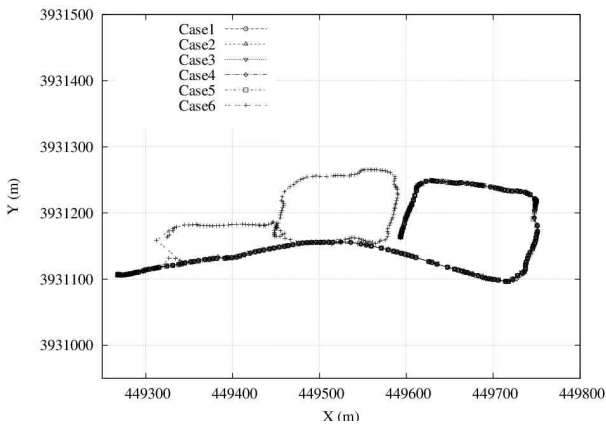
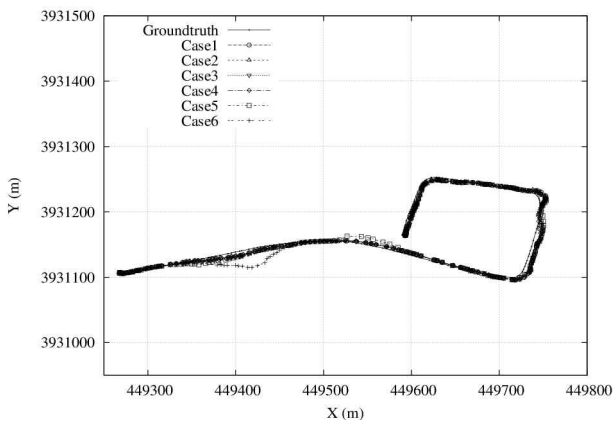


그림 9. 다양한 샘플링 실험에 대한 경로-1의 위치 추정 결과 (a) 기존 방법 (b) 제안방법 Fig. 9. Localization results for various sampling experiments of path-1 (a) UPS (b) UALS.



(a)



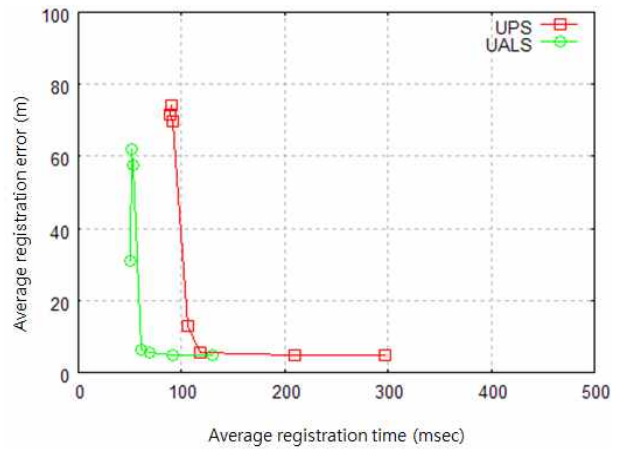
(b)

그림 10. 다양한 샘플링 실험에 대한 경로-2의 위치 추정 결과 (a) 기존 방법 (b) 제안방법

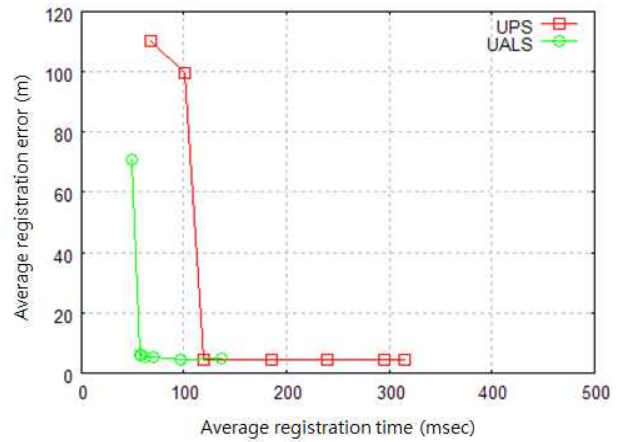
Fig. 10. Localization results for various sampling experiments of path-2 (a) UPS (b) UALS.

다. 경로-1의 비교에서는 실험1에서 실험4까지의 성능 비교에서 제안 방법이 기존 방법보다 우수함을 알 수 있었다. 그러나 실험5와 실험6의 경우에는 두 방법 모두 성능이 좋지 않음을 알 수 있다. 그림 10의 경로-2의 실험에서는 제안 방법이 실험6을 제외하고 실험1에서 실험5까지 우수한 성능을 보이고 있다. 반면 기존의 방법은 실험5와 실험6에서 좋지 못한 결과를 보이고 있다.

그림 9와 10에서는 일부 실험을 제외하고 위치추정 결과에 큰 차이가 없는 것으로 보이지만 표3과 4의 등록 수행시간을 고려하면 제안 기술의 성능이 더 우수함을 알 수 있다. 3차원 등록시간의 우수한 성능을 보여 주기 위하여 그림 11에서 3차원 등록 시간과 위치 추정 오차와의 관계를 보였다. 그림에서 가로축은 등록 시간을 보여준다. 등록의 시간이 줄어들어 위치추정의 속도가 증가하고 오차도 적은 경우가 이상적이라 할 수 있



(a)



(b)

그림 11. 3차원 등록시간에 대한 위치오차의 관계 (a) 경로-1 (b) 경로-2

Fig. 11. Relationship between registration time and localization error (a) path-1 (b) path-2.

다. 그림에서 보듯이 UALS 방법이 등록시간이 줄어도 오차가 여전히 작음을 알 수 있다.

## V. 결 론

본 논문에서는 무인 지상차량의 실시간 위치 추정을 위하여 전방향 3차원 센서에서 획득된 3차원 거리정보를 고속으로 등록하는 기술을 제안하였다. 3차원 정보의 고속 등록을 위하여 전방향 센서의 특성을 고려한 3차원 샘플링 방법인 균일 원호길이샘플 (UALS)방법을 제안하였다. 제안하는 방법을 이용하여 3차원 정보의 균일한 GSD를 유지함과 동시에 3차원 등록의 속도를 개선할 수 있었다. 또한 투영기반의 쌍정합 3차원 등록을 이용하여 고속의 지역기반 등록을 구현하였다. 제안



하는 위치 추정 기술을 실제 환경에서 획득한 2개의 이동 경로에 대하여 실험을 수행하고 성능을 분석하였다. 본 연구에서 제안한 기술을 기반으로 약 15Hz의 실시간 위치 추정이 가능함을 알 수 있었다.

### 참 고 문 헌

- [1] Hartley R. I., and Zisserman A., *Multiple View Geometry in Computer Vision*. Cambridge University Press., 2000.
- [2] Park S. Y. and Subbarao M., "An Accurate and Fast Point-to-Plane Registration Technique," *Pattern Recognition Letter*, Vol. 24 No. 16, pp. 2967-2976, 2003.
- [3] Downs A., Madhavan R., and Hong T., "Registration of Range Data from Unmanned Aerial and Ground Vehicles," *The 32nd Applied Imagery Pattern Recognition Workshop*, pp. 45 - 50, 2003.
- [4] A. Johnson, "Spin-Images: A Representation for 3-D Surface Matching", Ph.D. Thesis, CMU, 1997.
- [5] Battle E. , Matabosch C. and Salvi J., "Overview of 3D registration techniques including loop minimization for the complete acquisition of large manufactured parts and complex environments," *Proceedings of the SPIE*, Vol. 6356, pp. 635605, 2007.
- [6] Besl, P. J. and McKay., N. D., "A method for registration of 3-D shapes," *IEEE Trans. on Pattern Recognition and Machine Intelligence*, Vol. 14, No. 2, pp. 239 - 256, 1992.
- [7] S. Rusinkiewicz and M. Levoy, "Efficient variants of the ICP algorithm," *Proc. 3D Digital Imaging and Modeling*, pp. 145-152, 2001.
- [8] Madhavan, R., Hong, T., and Messina, E. "Temporal range registration for unmanned ground and aerial vehicles," *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, Vol. 44, No. 1, pp. 47 - 69, 2007.
- [9] Triebel, R., Pfaff, P., and Burgard, W., "Multi-level surface maps for outdoor terrain mapping and loop closing," *In Int'l Conf on Intelligence Robotics and Systems(IROS)*, pp. 2276 - 2282, 2006.
- [10] Levinson, J., Montemerlo, M., and Thrun, S., "Map based precision vehicle localization in urban environments," *In Proc. of Robotics: Science and Systems*, 2007.
- [11] Himmelsbach, M., Muller, A., Luttel, T., and Wunsche, H., "Lidar- based 3d object perception," *In Proc. of the 1st Int'l Workshop on Cognition for Technical Systems*, 2008.
- [12] Kummerle, R., Hahnel, D., Dolgov, D., Thrun, S., and Burgard, W., "Autonomous driving in a multi-level parking structure," *In Proc. of the IEEE Int'l Conf on Robotics and Automation*, 2009.
- [13] Park S. Y., Choi S. I., Moon J., Kim J., and Park Y. W., "Localization of an unmanned ground vehicle using 3D registration of laser range data and DSM," *Workshop of Applications of Computer Vision (WACV)*, 2009.
- [14] Park S. Y. and Choi S. I., "Real-time localization of an unmanned ground vehicle using a 360 degree range sensor," *International Conference on Computer Vision Theory and Applications*, 2011.

### 저 자 소 개



박 순 용(정회원)

1991년 2월 경북대학교 전자공학과 졸업 (공학사)  
 1993년 2월 경북대학교 전자공학과 졸업 (공학석사)  
 2003년 5월 미국 뉴욕주립대학교 스토니브룩 졸업 (공학박사)

1993년~1999년 한국원자력연구소 로봇개발연구실 선임연구원  
 2004년~2005년 한국전자통신연구원 디지털콘텐츠연구단 선임연구원  
 2005년~현재 경북대학교 컴퓨터학부 부교수  
 <주관심분야 : 3차원 컴퓨터비전 및 로봇비전>



최 성 인(학생회원)

2007년 2월 금오공과대학교 컴퓨터공학부 졸업 (공학사)  
 2009년 8월 경북대학교 전자전기컴퓨터학부 졸업 (공학석사)  
 2009년 9월~현재 경북대학교 전자전기컴퓨터학부 박사과정

<주관심분야 : 3차원 정합 및 복원, 로봇비전, 영상처리>