

DSM과 다시점 거리영상의 3차원 등록을 이용한 무인이동차량의 위치 추정: 가상환경에서의 적용

Localization of Unmanned Ground Vehicle using 3D Registration of DSM and Multiview Range Images: Application in Virtual Environment

박순용*, 최성인, 장재석, 정순기, 김준, 채정숙

(Soon-Yong Park, Sung-In Choi, Jae-Seok Jang, Soon Ki Jung, Jun Kim, and Jeong Sook Chae)

Abstract: A computer vision technique of estimating the location of an unmanned ground vehicle is proposed. Identifying the location of the unmaned vehicle is very important task for automatic navigation of the vehicle. Conventional positioning sensors may fail to work properly in some real situations due to internal and external interferences. Given a DSM (Digital Surface Map), location of the vehicle can be estimated by the registration of the DSM and multiview range images 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 first register a range image to the DSM coarsely and then refine the result. For coarse registration, we employ a fast random sample matching method. After the initial position is estimated and refined, all subsequent range images are registered by applying a pair-wise registration technique between range images. To reduce the accumulation error of pair-wise registration, we periodically refine the registration between range images and the DSM. Virtual environment is established to perform several experiments using a virtual vehicle. Range images are created based on the DSM by modeling a real 3D sensor. The vehicle moves along three different path while acquiring range images. Experimental results show that registration error is about under 1.3m in average.

Keywords: digital surface map, range image, 3D registration, localization, unmaned ground vehicle, robot vision

I. 서론

운전자의 조작없이 스스로 이동하는 차량을 무인이동차량(UGV: Unmanned Ground Vehicle)이라 한다. 자동차, 전차, 전동차 등의 ‘차(車)’의 형태를 가진 전통적인 육상(陸上) 이동수단을 운전자가 개입하지 않고 자율적으로 이동하기 위한 노력에서 UGV의 연구가 진행되어 왔다. 자율적으로 이동한다는 점에서 UGV는 자율이동로봇과 넓은 개념에서는 동일하게 볼 수 있지만 UGV의 연구 분야는 주로 기존차량을 대상으로 한 자율이동 기술을 다루고 있다. 따라서 UGV의 개발은 로봇이 아닌 차량 형태의 이동플랫폼에 관점을 두고 있으며 그 응용 또한 기존의 차량이 사용되고 있는 분야에 적용되고 있다[1,6,8,11].

UGV의 응용분야에서 가장 두드러진 부분은 군사분야이다. 현재 군사분야에서는 다양한 형태의 유인 차량 또는 유인 이동플랫폼이 사용되고 있는데 군사분야의 특성상 운전자가 실제 상황에서는 위험에 노출될 수 있는 경우가 빈번하기에 무인화의 중요성이 높을 수밖에 없다. 국내뿐만 아니라 국외의 경우에도 군사용 이동차량에 대한 무인화 관련 연구가 많이 진행되고 있다. UGV에 속하는 무인 자동

차의 주행 기술을 겨루는 “Grand Challenge”와 같은 국제대회가 미국 국방성인 DARPA에 의하여 지원되고 있다. 미국 CMU의 로봇연구소는 UGV를 중점적으로 연구하고 있으며 민간부분뿐만 아니라 군사용 UGV의 개발을 진행하고 있다 [9,10].

UGV와 같은 무인이동플랫폼에서 가장 중요한 기술의 하나는 차량이 이동하는 공간에서 스스로 어디에 있는지를 알아내는 위치인식(localization) 기술이다. 이는 자율이동로봇 분야에서도 중요하게 다루는 SLAM (Simultaneous Localization & Mapping) 기술의 하나로 볼 수 있다[12]. 하지만 본 논문에서 제안하고자 하는 기술은 SLAM과는 차이점을 두고 있다. SLAM기술은 이동로봇의 위치 인식 및 주변환경에 대한 지도작성을 동시에 구현하는 것이지만 본 논문에서 다루고자하는 기술은 위치인식 기술에 국한하고 있다.

군사용 UGV가 이동하는 공간은 주로 야지(野地)이다. 기존의 전차 또는 군용차량은 대부분 야지를 주행하는 차량이다. 따라서 실내의 자율주행을 주로 다루는 SLAM과는 다른 관점에서 위치인식을 다루어야 한다. 군사용 UGV는 주어진 지도정보를 바탕으로 위치를 인식하는 것이 일반적이다. 여기서 지도정보는 주로 DEM (Digital Elevation Map) 또는 DSM (Digital Surface Map)을 말한다. DEM과 DSM은 지형의 3차원 정보를 가지고 있지만 DSM은 DEM과 달리 건물 또는 나무 등 지표면 위에 있는 물체의 3차원 정보까지 포함하고 있다.

본 논문에서 다루고자 하는 UGV의 위치인식 기술은

* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수: 2009. 3. 2., 채택확정: 2009. 5. 20.

박순용, 최성인, 장재석, 정순기: 경북대학교 컴퓨터공학과
(sympark@knu.ac.kr/ellim5th@naver.com/jsjang@vr.knu.ac.kr/skjung@knu.ac.kr)

김준, 채정숙: 국방과학연구소

(wns3381@paran.com/lovclatters@daum.net)

※ 본 논문은 국방과학연구소에서 지원하여 연구하였음.

DSM을 이용하고자 한다. 그리고 UGV는 주위환경의 거리영상을 획득할 수 있는 3차원 센서를 가지고 있다고 가정한다. 실제 UGV의 운용에서는 자기위치를 인식할 수 있는 GPS와 같은 다양한 위치 센서들이 있지만 이들 위치센서가 동작하지 않는 상황을 고려해야만 한다. 이러한 경우에는 거리영상 센서만을 이용하여 주변환경의 3차원 정보를 획득하고 DSM과 비교함으로써 UGV의 위치를 인식하는 기술이 필요하다. UGV에서 획득된 거리영상은 DSM과 같이 지형과 지물의 3차원 표면(surface)정보를 가지고 있다. 따라서 UGV의 획득정보가 DSM에서 어디에 존재하는지의 3차원 유클리디안 변환(Euclidean transform)정보를 추정하여 UGV의 위치를 인식하도록 한다.

위성 또는 항공기를 이용하여 획득한 DSM을 활용하여 위치인식을 다룬 대표적 논문은 [16,17]을 들 수 있다. 이들은 항공기에서 촬영된 DSM에서 나무와 같이 UGV에서 획득하기 어려운 대상을 필터링하고 spin[7] 영상을 이용하여 3차원 등록을 구현하였다. Dawns[6] 등은 항공기에서 획득한 DSM과 지상 UGV에서 획득한 거리영상을 ICP[3] 알고리즘으로 등록을 구현하였다. DSM을 사용하지 않지만 UGV에 장착된 센서로 3차원 거리정보를 획득하고 이를 연속적으로 등록하여 위치를 추정하는 기술은 Madhavan [9-11] 등에 의하여 개발되었다. 이들은 ICP와 Kalman 필터링을 이용한 위치추정 기술에 대하여 기술하였다. UGV에 적용된 예는 아니지만 Zhang[19] 등은 항공 촬영된 DSM과 지상의 3차원 영상을 영상처리 기법으로 등록하였다. 이들은 3차원 높이값을 2차원 영상의 밝기값으로 간주하고 경계선 추출 기법을 사용하여 건물의 3차원 모델을 등록하였다.

본 논문에서는 제안하는 위치추정 기술은 두 단계로 나누어진다. 우선 특징기반(feature-based)의 3차원 등록 기술로 UGV의 초기 위치를 개략적으로 (coarsely) 인식하고 이어서 비특징기반(non-feature based)의 기술로 정밀하게 위치를 인식하는 기술을 제안한다. 제안 기술의 수행과정은 다음과 같다. 이동하는 UGV에서 3차원 센서를 이용하여 연속적으로 거리영상을 획득한다. 획득된 거리영상의 첫 번째 프레임을 특징기반 등록기술로 UGV의 초기위치를 개략적으로 인식한다. 그리고 비특징기반 3차원 등록 알고리즘을 이용하여 정확한 위치를 추정한다. 이후 연속되는 거리영상 프레임에 대해서도 비특징기반 등록을 이용하여 고속으로 위치를 인식한다. 본 논문에서는 국내의 특정 지역의 지형 및 지물에 대한 실측 DSM을 이용하여 가상 UGV에서 획득한 거리영상을 이용하여 실험을 진행하였다. 가상의 3차원 센서는 실제 센서의 사양과 동일한 조건으로 실험을 진행하였다. 실험 결과 가상 UGV의 위치인식 오차는 평균 1m 이내를 보였다.

UGV에 대한 기존의 위치추정 기술은 대부분 초기위치를 GPS 등과 같이 외부 장치에 의존하고 있다. 본 논문과 유사하게 비특징기반 정합을 사용하고 있는 Madhavan [9-11]의 논문에서는 이동플랫폼의 초기위치를 GPS에 의존하고 있다. 또한 spin특징정보를 사용하는 [16,17]의 기술은 초기 위치추정을 GPS 또는 spin 특징점을 사용하고 있다. 이 논문은 이동플랫폼의 연속된 위치추정도 spin특징을 사

용하고 있어 비특징정합을 다루는 본 논문의 기술과는 차이점이 있다. 본 논문에서 제안하는 바와 같이 특징정합 그리고 비특징정합을 결합하여 무인이동플랫폼의 위치를 추정하는 논문은 거의 없는 실정이다.

본 논문의 II 장에서는 무인이동플랫폼의 위치인식을 위한 방법론을 기술한다. III 장과 IV장에서는 특징기반 및 비특징기반 3차원 등록기술을 다룬다. V 장에서는 UGV의 위치인식실험을 위한 가상공간을 DSM으로부터 생성하는 과정에 대하여 기술하고, VI 장에서는 UGV에서 획득한 다시점 거리영상과 DSM의 3차원 등록 실험 결과를 다룬다. 마지막 VII 장에서는 논문의 결론을 맺는다.

II. 3차원 등록기술의 위치인식 적용 방법

동일한 지형 또는 지물에 대하여 서로 다른 시점에서 획득한 두 개 이상의 3차원 정보 사이의 변환관계를 추정하는 것을 3차원 등록 (3D registration, 또는 3차원 정합)이라 한다. 서로 다른 시점에서 획득한 3차원 점(point) 또는 표면(surface)정보에는 동일한 물체에 대하여 일치하는 3차원 일치점 (correspondence)이 존재하며 충분한 수의 일치점을 찾아 3차원 정보 사이의 변환 정보를 구할 수 있다.

3차원 등록 또는 정합 기술은 크게 두 가지로 나눌 수 있다. 특징기반 (feature-based) 및 비특징기반 (non feature-based) 기술이 이들이다. 일반적으로 3차원 형상의 특징점을 찾고 이들 특징점 비교를 이용하여 일치점을 찾는 과정이 특징기반 3차원 등록이라 할 수 있다. 3차원 특징기반 기술은 대표적으로 spin[7], point fingerprint[15], fast-random sample[18] 등을 들 수 있다. 비특징기반 3차원 등록은 기하학적 거리가 가장 짧은 점들 사이의 변환관계를 추정하는 기술로 기하 일치점의 종류에 따라 ICP (Iterative Closest Point)[3,14], point-plane[5,14], projection[4,14], IPP (Iterative Projection Point)[13] 등으로 나눌 수 있다. 일반적으로 특징기반은 한 번의 실행으로 결과를 도출하는 반면, 비특징기반 기술은 반복적인 방법으로 결과를 도출한다. 특징기반의 경우 그 결과가 특징 추출 및 특징의 비교에 의존하기 때문에 일반적으로 정확하지만 어느 정보 오차를 가지고 있다. 이를 보완하는 방법으로 비특징기반의 등록으로 3차원 정보의 기하정보와 일치하도록 매우 정확한 등록을 구현할 수 있다.

야지에서 이동하는 UGV는 위치인식을 위한 센서를 기본적으로 가지고 있다. 이들은 INS (Inertial Navigation System)가 될 수 있고 혹은 GPS (Global Positioning System)가 될 수도 있다. 하지만 이들의 위치 정보에는 오차가 존재하기 마련이다. 관성항법장치라 불리는 INS는 이동차량의 이동에 따라 위치오차가 누적되는 단점이 있고, GPS는 근본적인 오차를 가지고 있을 뿐만 아니라 구름이 많거나 주변지형의 복잡도에 영향을 받는다. 이러한 문제는 비단 UGV의 위치인식문제에 국한된 것이 아니라 자율이동로봇의 위치인식 문제에도 해당되기도 한다. SLAM기술 연구에 있어 최근 비전 기술의 접목이 늘어나듯이 UGV의 위치인식에서도 차량에 장착된 기존의 센서의 오차를 보정하는 기술의 개발이 필요하다.

표 1. 특징기반 및 비특징기반 등록기술의 비교.

Table 1. Comparison of feature-based and nonfeature-based registration techniques.

위치추정방법	특징기반	비특징기반
일치점 탐색	특징점 비교	기하거리 비교
3차원등록속도	느림	빠름
초기오차제약	없음	있음
적용방법	개략적 등록	등록오차의 정제
알고리즘	Spin, FRSM, 3D-fingerprint	ICP, IPP

본 논문에는 UGV가 이동하는 지역의 DSM과 차량에 탑재된 3차원 센서로 획득한 거리영상을 3차원 등록하고 그 결과로 UGV의 위치를 인식하는 것을 목적으로 한다. UGV의 초기위치는 크게 두 가지로 구분할 수 있다. 초기위치를 전혀 알 수 없거나 오차가 매우 큰 경우, 그리고 초기오차가 비교적 작은 경우로 나눌 수 있다. 두 가지의 경우로 초기오차의 크기를 나누는 기준은 비특징기반 등록 기술로 오차를 보정할 수 있는가에 있다. 비특징기반 등록 기술은 특징기반 등록기술에 비하여 속도가 빠른 특징을 가지고 있다. 따라서 고속으로 이동하는 UGV의 위치를 연속적으로 추정하기 위하여 비특징기반 등록 기술의 적용이 유리하다. 단 비특징기반의 등록 기술은 초기오차가 큰 경우 적용할 수 없는 단점이 있어 초기오차를 최소화하기 위한 특징기반의 등록이 선행되어야 한다. 따라서 UGV의 위치인식을 위해서는 특징기반의 등록기술로 개략적인 3차원 위치를 추정하고 이후 비특징기반의 등록기술로 등록오차를 정제(refinement)하는 접근법이 필요하다. 표 1에서는 특징기반 및 비특징기반 등록기술을 비교하고 있다.

그림 1에서는 본 논문에서 제안하고자 하는 UGV의 위치인식 기술에 대한 접근법을 보여준다. DSM은 디지털 지도 정보로 UTM (Universal Transverse Mercator) 좌표계로 표현되며 논문에서는 “DSM 좌표계”로 부른다. UGV에서 획득한 3차원 거리영상은 “센서 좌표계”로 표현되며 우리는 이를 월드거리모델 (World Range Model, c)이라 부른다. DSM좌표계에 대한 UGV의 초기위치는 T_c 이며 이는 개략등록의 결과로 얻을 수 있다. 그리고 비특징기반의 등록의 결과로 얻어지는 변환정보 T_e 를 곱하여 UGV의 위치정보를 결정할 수 있다.

$$T'_c = T_e T_c \tag{1}$$

그림 2는 위치인식의 상태천이도를 보여준다. 세 부분으로 구역이 나누어진 것은 등록오차의 정도에 따른 것으로 고려할 수 있다. UGV가 위치정보를 잃어버리거나 기타 오류로 인하여 위치오차가 매우 크게 발생한 경우에는 3차원 개략등록(coarse registration)으로 위치오차를 줄여야 한다. 개략등록 후는 위치오차가 작은 경우이므로 비특징기반의 등록기술로 이동하는 UGV의 위치를 고속으로 추정할 수 있다. 한편 비특징기반의 등록은 다시 DSM과 WRM의 정제등록, 그리고 WRM 간의 정제등록으로 구분할 수 있다. 일반적으로 DSM과 WRM 사이의 등록으로 위치를 정확히 추정할 수 있지만 DSM은 WRM 보다는 정보량이 매우 많

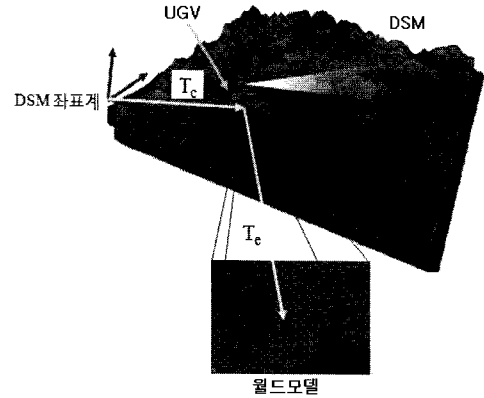


그림 1. UGV의 위치인식.
Fig. 1. Localization of UGV.

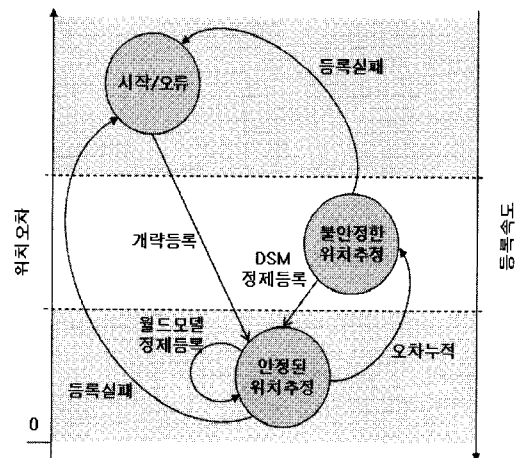


그림 2. UGV의 위치오차 상태천이도.
Fig. 2. State transition diagram of the position error of UGV.

다. 따라서 등록의 시간을 줄이기 위해서는 연속된 WRM 사이의 등록으로 위치를 추정할 수 있다. 한편 WRM 사이의 정제등록은 UGV의 위치를 연속적으로 추정할 수 있으나 실제 거리영상에는 잡음이 존재하기에 그림 2에서와 같이 누적오차가 발생할 수 있다. 누적오차가 점점 커져서 비특징기반의 등록기술을 사용할 수 없을 정도에 다다르면 개략등록을 다시 시행하여야 한다. 이러한 오류가 발생치 않게 하기 위해서는 누적오차가 커지기전에 DSM과 월드모델 간의 정제등록을 실시해주어야 한다.

본 논문에서는 비특징기반 등록기술을 고속으로 구현하기 위하여 WRM 간 (World to World, WtoW)의 정제등록을 실시하고 일정한 프레임 간격으로 WRM과 DSM 사이 (World to DSM, WtoD)의 정제등록을 실시하는 방법을 사용하였다.

III. UGV 초기위치인식

본 논문에서 FRSM (Fast Random Sample Matching) 알고리즘 바탕으로 UGV의 개략위치를 추정하였다[18]. 먼저 그림 3에서와 같이 3차원 모델 A와 B를 개략등록한다고 가정하자. 모델 A에서 임의의 점 p_i , 모델 B에서 임의의 점 p_j 를 선택한다. 그리고 p_i, p_j 로부터 각각 반경 m 내에 있는 임의의 점 q_i 와 q_j 를 각각 A와 B에서 추가적으로 선택한다.

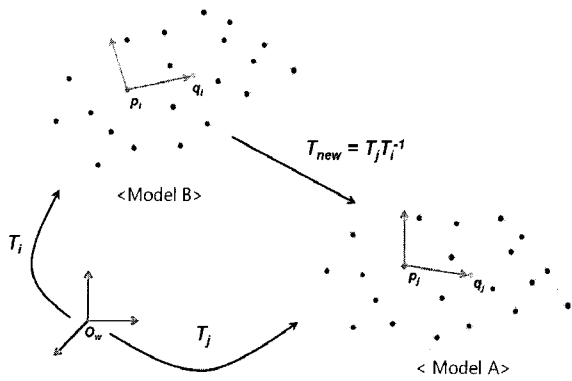


그림 3. 임의의 두 점과 그 정합점을 이용한 3차원 변환행렬 추정.

Fig. 3. 3D transformation using random samples and their correspondences.

이후 다음 식 (2)를 이용하여 (p_i, q_i) 쌍과 (\hat{p}_i, \hat{q}_i) 쌍에 대한 변환 행렬 T_i, T_j 를 각각 추정한다.

$$\begin{aligned}
 T_i &= [R_i | t_i] \\
 R_i &= [r[0]^t, r[1]^t, r[2]^t] \\
 t_i &= p_i \\
 r[0] &= \hat{p}_i, \quad r[0] = r[1] \otimes r[2] \\
 r[1] &= \frac{p_i - q_i}{\|p_i - q_i\|} \\
 r[2] &= \hat{p}_i \otimes r[1]
 \end{aligned} \tag{2}$$

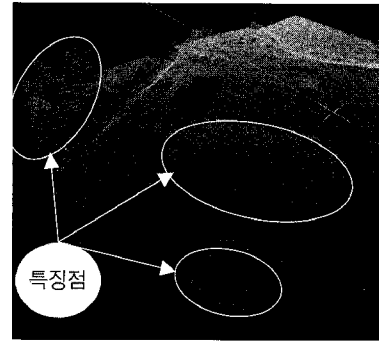
T_i 와 T_j 가 생성되면 식 (3)을 이용하여 3차원 정합을 위한 변환 행렬 T_{new} 를 생성한다.

$$T_{new} = T_j T_i^{-1} \tag{3}$$

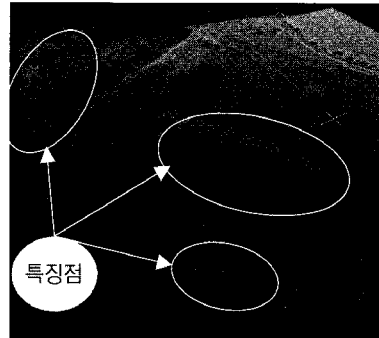
T_{new} 가 구해지면 모델 B에 T_{new} 를 적용한다. 그리고 정합 오차를 측정하기 위하여 모델 A와 B에 있는 각 점의 최소근접점(closest point)의 거리를 평균한다. 평균값이 임계값(threshold) 이하가 될 때까지 위의 과정을 반복하여 수행한다.

FRSM에서 가장 중요한 것은 임의의 점들을 선택하여 빠르게 두 모델사이의 변환관계를 추정하는데 있다. 하지만 3차원 데이터의 양이 너무 방대하기 때문에 임의로 3차원 점을 추출하여 자세를 비교하는 것도 한계가 있다. 그래서 3차원 모델상의 수많은 점들 중에 기하적인 특징이 두드러진 부분의 점들을 특징점으로 선별하고, 이 특징점들 중에서 (p_i, q_i) 쌍과 (\hat{p}_i, \hat{q}_i) 쌍을 선택하는 방법이 필요하다.

본 논문에서 3차원 모델을 빠르게 정합하기위하여 다음과 같은 FRSM 기술을 제안하였다. 우선 DSM과 WRM에 대해서 Harris 코너점에 해당하는 점들을 특징점으로 추출하였다. 그러나 일반적인 경우 그림 4(a)와 같이 너무 많은 점군(point clouds)이 추출되는 경향을 보이므로 코너 추출 알고리즘 수행 전에 메디안 필터를 적용하여 특징점 추출에 방해가 될 수 있는 잡음 요소를 제거하였다. 그림 4(a)와 4(b)는 DSM에서 특징점을 추출한 것으로 4(a)의 경우 500×500 해상도의 DSM에서 408개의 특징점이 추출되었으며, 4(b)의 경우 292개의 특징점이 추출되었다.



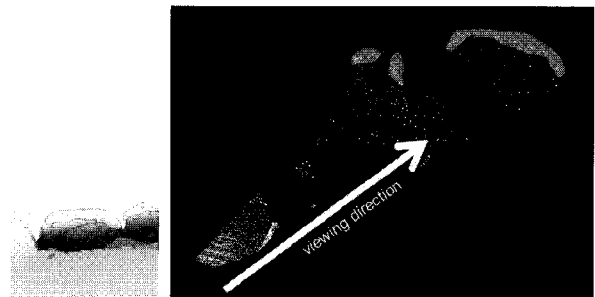
(a) Before



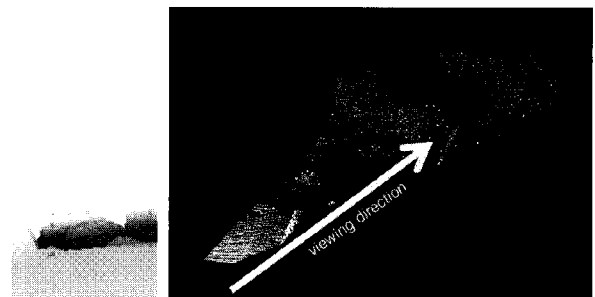
(b) After median filtering

그림 4. 필터링 전 후 코너점 추출 비교.

Fig. 4. Comparison of corner detection.



(a) Before removal



(b) After removal

그림 5. 특징점 정제로 3차원 모델 경계의 코너점 제거.

Fig. 5. Removal of corner features.

특징점이 추출되면 자세 추정에 오류를 일으킬 수 있는 특징점에 대한 제거 작업이 필요하다. 코너 추출 알고리즘의 특성상 WRM의 경계부분에서 코너가 추출될 수 있다. 이러한 점들은 실제 물체의 코너점이 아니므로 제거가 필요하다. 본 논문에서는 이 과정을 특징점 정제로 정의하였다. 그림 5는 월드모델에서 추출한 특징점들을 정제 전과 후의 모습을 보여주고 있다. 그림 5(a)의 경우 좌측은 WRM

을 거리영상의 형태로 보여주고 있다. 특징점이 추출된 부분은 주로 건물 영역으로 노란색 테두리에 속하는 특징점들은 건물의 지붕부근에서 추출된 특징점으로 제거 대상이 되는 점들이다. 건물의 지붕에서 추출된 특징점들은 실제 유용한 특징점이라기보다는 거리센서가 지붕의 중간지점 이후에는 측정범위에 넘어서기 때문에 그 경계선에서 마치 3차원 코너가 있는 것과 같은 효과가 발생하였다. 이는 Harris 코너점 추출 알고리즘이 2차원 이미지에 기반한 것이기 때문에 발생한 것이다. 그래서 그림 5(b)와 같이 거리영상 위에 3x3 윈도우 영상으로 템플릿 연산을 수행하면서 3차원 모델의 외곽에 해당된다고 판단되는 부분에 대해서는 제거작업을 수행하였다. 특징점 정제 후 건물의 지붕영역에 잘못 추출된 특징점들이 제거된 모습을 볼 수 있다.

빠른 자세추정을 위해서 특징점의 수를 줄이는 것 외에도 (p_i, q_i) 쌍과 (\hat{p}_i, \hat{q}_i) 쌍을 선택 하는 방법에 제약을 둬으로써 알고리즘의 속도를 향상시킬 수 있다. 우리는 WRM이 이동하는 차량에서 획득되고 있다는 가정 하에 다음과 같은 제약 사항을 고려하였다.

- 1) p_i 와 q_i 의 거리: 너무 짧은 것은 불안정 결과 초래
- 2) \hat{p}_i 와 \hat{q}_i 의 내적: 특징점의 방향이 유사해야 함
- 3) $\overrightarrow{p_i q_i}$ 와 $\overrightarrow{p_j q_j}$ 의 길이: 일치점이라면 거의 동일
- 4) $\overrightarrow{p_i q_i}$ 와 $\overrightarrow{p_j q_j}$ 의 내적: 일치점이라면 거의 동일

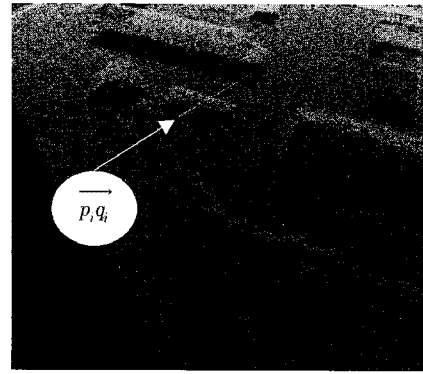
그림 6은 이와 같은 제약 사항을 바탕으로 본 논문에서 제안한 개략등록의 유사(pseudo) 코드를 보여준다.

그림 7은 제안한 개략등록 알고리즘을 이용하여 DSM과 월드 모델의 정합을 수행한 결과를 보여준다. 그림 7(a)와 7(b)에서 보이는 녹색 점(밝은 점)들은 DSM과 WRM의 특징점들이며, 정합이 되었다고 판별되는 시점에 사용된 (p_i, q_i) 쌍과 (\hat{p}_i, \hat{q}_i) 쌍을 각각 하늘색 직선 (밝은 직선)으로 표시하였다. 그리고 8은 DSM과 WRM의 정합 전과 후를 보여준다.

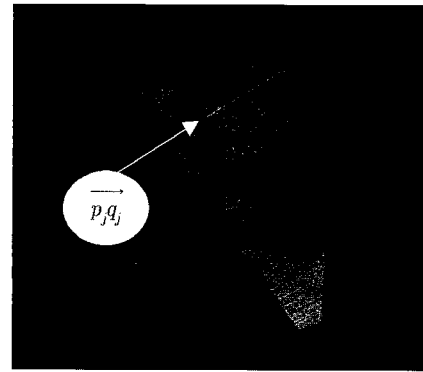
```

while(1) {
    월드모델에서 임의의  $p_i$ 선택
    DSM에서 임의의  $q_i$ 선택
        제약1)  $p_i$  와  $q_i$  의 거리
        제약2)  $p_i$  와  $q_i$  의 내적
    월드모델에서 임의의  $p_j$ 선택
    DSM에서 임의의  $q_j$ 선택
        제약3)  $p q_i$ 와  $p q_j$ 의 길이 비교
        제약4)  $p q_i$ 와  $p q_j$ 의 내적
    if(모든 제약 만족)
         $T_{new}$  생성 및 정합 수행
        정합 오차 기록
        if(정합오차 만족 || 제한시간 만료)
            종료
    }
    
```

그림 6. 점 p와 q의 선택 제약 과정.
Fig. 6. Constraints of selecting points p and q.



(a) Pose of DSM



(b) Pose of world model

그림 7. FRSM로 결정된 정합 점들.

Fig. 7. Correspondences by FRSM.

IV. UGV 정밀위치인식

1. 월드거리모델 간(WtoW)의 정합

UGV에서 획득한 거리영상을 앞 장에서 기술한 바와 같이 개략등록을 수행한 후 그 결과를 향상시키는 과정을 구현하였다. 이를 등록의 정제 (registration refinement)라 한다. 본 논문에서는 거리영상의 정교한 정합을 위해 앞서 설명한 바와 같이 비특징기반의 등록기술을 사용한다. 비특징기반의 등록 기술은 ICP와 같은 점대점 (point to point) 방법, 점과 면의 일치점을 찾는 점대면(point to plane) 방법, 점과 투영점사이의 일치점을 구하는 점대투영점(point to projection)방법이 대표적이다. 본 논문에서는 점대면과 점대투영점 방법의 장점을 결합한 IPP 기술을 사용하였다[13]. 점대투영점 방식은 고속 탐색 알고리즘을 사용하는 대신 2.5차원의 거리 영상과 3차원 곡면사이의 투영관계를 이용한다. IPP 방식은 두 거리영상의 초기 위치가 큰 오차를 가지고 있을 때 점대투영점 방식보다 정확하게 거리영상을 정합한다.

IPP 방법을 간략히 설명하면 그림 9와 같다. 3차원 공간에 두 개의 표면 모델 S 와 D 가 놓여있다고 가정하자. 우선 표면 S 의 3차원 점 P_0 의 일치점 Q 를 곡면 D 에서 찾아야 한다. 비특징 기반의 등록 기술에서 일치점으로 간주하는 P_0 와 Q 는 등록 초기에는 실제로 일치하지는 않는다. 하지만 등록을 반복하면서 이들은 기하적으로 일치점으로 만들어진다. IPP와 같은 점대면 및 점대투영점 결합방법에서는 우선 P_0 를 D 곡면의 2차원 거리영상으로 투영(projection)하여 영상좌표 p 를 구한다. 좌표 p 에 해당하는 D 의 점 Q'

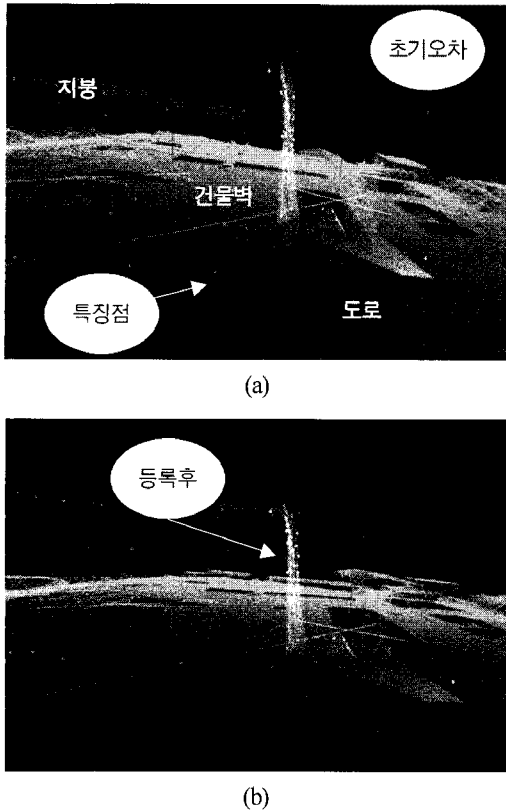


그림 8. 개략등록의 (a) 전 (b) 후 비교.
Fig. 8. (a) Before and (b) After coarse registration.

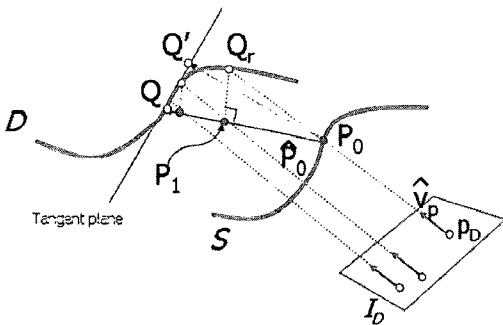


그림 9. IPP 기술을 이용한 정합점 탐색.
Fig. 9. Correspondence search using IPP.

는 거리영상을 이용하여 구할 수 있다. 이 점을 다시 P_0 의 법선 벡터(normal vector)에 투영하여 P_1 을 구하고 위의 과정을 P_k 가 수렴할 때까지 반복하여 Q 를 구한다. P_k 는 위의 과정을 반복할수록 Q' 과 거리가 매우 가까워진다. 따라서 일정거리 이하로 두 점 사이가 가까워지면 반복을 종료하고 수렴되는 곡면 D 의 점을 Q 라 한다. 일단 Q 가 구해지면 최초의 곡면 S 의 점 P_0 를 Q 가 접하는 탄젠트면 (tangent plane)에 투영하여 최종적으로 Q' 를 구한다.

위와 같은 방법으로 충분한 수의 대응점 집합 $\{P\}$ 와 $\{Q\}$ 를 구하고 두 점집합 사이의 등록 오차 ϵ 를 최소화하는 변환 행렬 T 를 구하기 위하여 수식 (4)의 해를 SVD (Singular Value Decomposition)를 이용하여 구한다[2].

$$\epsilon = \sum_i \| P_i - TQ_i \|^2 \quad (4)$$

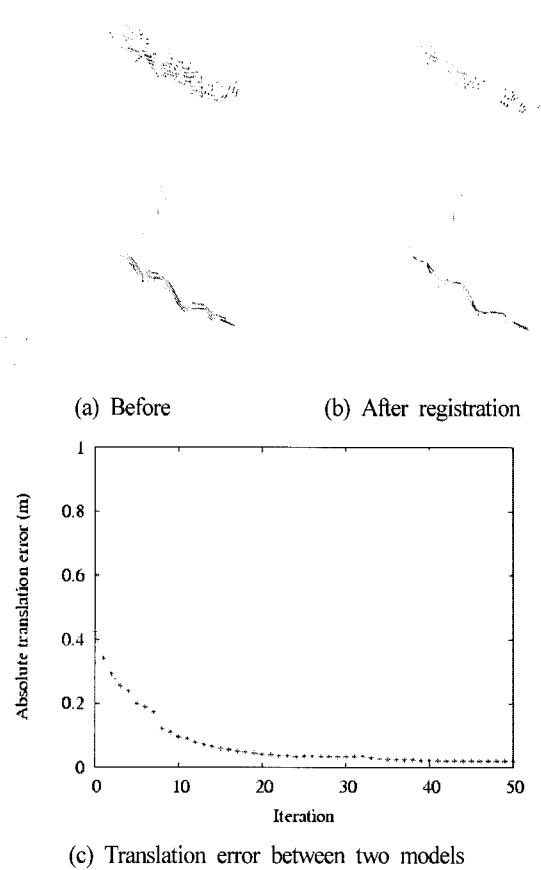


그림 10. 월드모델 등록정제.
Fig. 10. Registration refinement of world models.

그림 10에서 보이는 정제등록의 예를 살펴보자. 그림 10 (a)에서는 두 개의 WRM이 매우 근접하여 등록된 모습을 볼 수 있다. 하지만 붉은색 (열은회색)의 WRM과 푸른색(질은회색)의 WRM을 자세히 보면 두 모델 사이가 떨어진 것을 볼 수 있다. 정제등록 후 두 모델의 간격은 거의 줄어든 것을 알 수 있으며 그림 10(c)의 그래프에서 볼 수 있듯이 모델 사이의 이동오차가 0.1m이하로 떨어진 것을 알 수 있다. 여기서 두 모델 사이의 정제등록은 50회의 반복을 거친 후 결정된 변환행렬을 이용하여 수행하였다. WRM의 경우 128×128의 해상도를 가지고 있는데 본 논문에서는 200~300개 정도의 점군을 샘플링하여 일치점을 탐색하였다.

2. 월드거리모델과 DSM 사이의 정합 (WtoD)

연속적으로 획득한 월드거리모델을 3차원 등록하는 방법은 다양하다. 현재 획득한 하나의 3차원 모델을 이전에 등록된 모든 3차원 모델과 등록을 고려할 수 있다. 이 경우에는 현재 모델과 이전 모든 모델의 등록오차가 최소화되는 문제를 다루어야 한다. 다른 방법으로는 현재의 모델을 이전에 등록된 n개의 모델과의 등록을 들 수 있다. 즉, 이전에 등록된 모든 모델대신에 n개의 모델과의 등록오차를 최소화하도록 현재의 모델을 등록하는 문제로 줄일 수 있다. 이 때 n=2인 경우는 바로 이전에 등록된 모델과 현재 모델의 등록만을 고려하며 이를 쌍성 등록(pairwise registration)이라 한다. 두 3차원 모델 사이의 등록은 가장 단순하고도 빠른 방법이라 할 수 있다. 하지만 연속적으로 획득한 모델을 계속 등록하다보면 맨 처음 모델과 현재의 모델 사이에

는 누적오차가 발생하는 단점이 있다. 이는 그림 10(c)에서 보인바와 같이 획득된 WRM이 잡음이 없는 이상적인 모델이 아닌 이상 정제등록을 마친다고 하여도 모델 사이에는 등록오차가 항상 존재하기 때문이다. 이러한 오차가 누적되는 경우에는 위치추정의 오차를 무시할 수 없게 된다.

본 논문에서는 WtoW 정제등록을 실시하는 과정에서 월드거리모델을 DSM에 정제등록하는 과정을 매 n프레임마다 실시하였다. WtoD를 IPP로 구현하기에는 DSM의 정보량이 너무 많아 표면모델을 생성하는데 시간이 많이 걸리는 단점이 있어 ICP를 이용하여 구현하였다. 단 속도를 빠르게 구현하기 위하여 kd-tree알고리즘을 이용한 고속 최소근접탐색을 이용하였다[14].

V. 실험결과

1. 가상 월드거리모델의 획득

UGV의 위치인식 실험을 가상환경에서 실시하기 위해서는 DSM을 이용하여 WRM을 획득하여야 한다. DSM은 UGV의 실험 공간에 대한 3차원 정보를 점군 정보로 입력되며, 각 3차원 점은 UTM의 좌표계로 (X,Y,Z)로 표현된다. DSM의 GSD (Ground Sample Distance)는 0.25m로 지형 및 지물의 3차원 형상을 매우 정밀하게 표현하고 있다. DSM과 같이 대용량 지형을 렌더링하기 위하여 본 실험에서는 DSM을 쿼드 트리(Quad-tree)로 구성하고, LOD (Level of Detail)와 View Frustum Culling을 적용하여 실시간으로 지형을 렌더링 하였다.

1.1 지형 구성

그림 11(a)는 3x3 지형 데이터로 LOD 메쉬를 구성하는 기본 단위이다. 초기 지형은 중앙과 사각형 각 꼭지점의 정점(실선)으로 나뉘고, 사각형의 변에 존재하는 정점(점선)들을 메쉬를 구성하는 정점에 추가할 것인지를 결정한다. 점선으로 된 정점들을 메쉬 내부에 추가하게 되면, 추가된 정

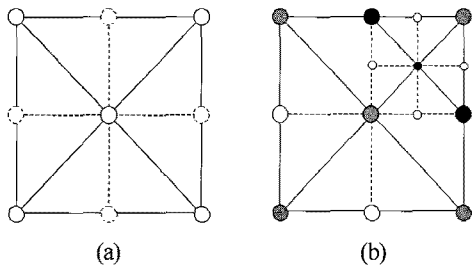


그림 11. (a) 3x3 지형정보 (b) 4분면 중 한 면의 분할 결과.
Fig. 11. (a) 3x3 surface data (b) Division of a single quadrants.

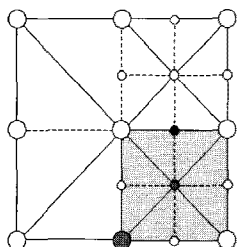


그림 12. 공유되는 정점에 이웃하는 사분면의 갱신.
Fig. 12. Updating the quadrant of a sharing vertex.

점들은 이전에 메쉬를 구성하던 정점들과 동일하게 정사각형을 구성하는 정점으로 취급할 수 있다.

4개의 사분면이 어떤 조합으로 내부 분할이 가능하다면, 분할된 4개의 사분면들은 하나의 정사각형으로 다룰 수 있고, 사분면들의 중앙 정점을 메쉬를 구성하는 정점으로 추가해야 한다. 또한 분할된 사분면에 있어서 각 귀퉁이 정점이 되는, 상위(부모) 정사각형의 변에 존재하는 정점들을 메쉬를 구성하는 정점으로 지정할 필요가 있다. 그림 11(b)에서 사분면의 우측 상단 사분면을 분할할 경우 우측 상단의 중앙 정점을 추가하고, 분할된 사분면의 변에 존재하는 정점(검은색 정점)과 함께 메쉬를 구성하는 정점으로 지정한다.

분할된 하위사각형 안의 한 변의 정점이 이웃하는 하위사각형과 공유되는 경우, 한 변 정점을 지형을 구성하는 메쉬에 추가하려면, 그 정점을 공유하는 하위사각형 역시 분할된다. 그리고 그 사각형의 변에 존재하는 정점들도 메쉬를 구성하는 정점에 추가된다. 그림 12과 같이 우측 상단 사분면을 갱신할 때, 검은색 정점을 메쉬에 추가하면, 그 정점은 아래에 존재하는 사분면(회색 사분면)에도 속하므로 그 사분면도 갱신되어야 한다. 갱신되는 과정에서 회색 정점들도 메쉬에 추가된다.

1.2 Level of Detail(LOD)

LOD는 현재 시점에서 가까운 곳은 자세하게 렌더링하고, 먼 지점은 대략적으로 렌더링 함으로써 사용자가 눈으로 보기에 부자연스럽지 않을 뿐만 아니라, 실시간으로 지형을 렌더링 할 수 있도록 한다. 본 논문에서는 쿼드 트리를 현재 시점과 정점과의 거리에 의하여 LOD 메쉬를 생성한다. 분할된 사분면의 각 정점들을 LOD 메쉬를 구성하는 정점으로 추가할 것인지에 대한 판단여부는 수식 (5)를 이용한다.

$$\vec{V}_{dir} = \vec{V}_{vertex} - \vec{V}_{view}$$

$$Distance = \|\vec{V}_{dir}\| \tag{5}$$

$$enable = error \times thresh < Distance$$

\vec{V}_{vertex} 는 추가하고자 하는 정점의 벡터, \vec{V}_{dir} 은 카메라 위치에 대한 벡터, \vec{V}_{dir} 은 카메라 위치에서 정점으로의 벡터이다. 정점의 실제 위치의 차이에 임계값을 곱한 값이 \vec{V}_{dir} 의 norm보다 작을 경우에 하나의 정점을 LOD 메쉬를 구성하는 정점으로 추가한다.

2. UGV의 위치추정 실험

가상환경에서 생성한 WRM을 바탕으로 실측 DSM에 대한 등록 실험을 수행하였다. 가상환경에서 획득한 WRM은 OpenGL에서 구현한 LOD에 따른 렌더링의 영향으로 DSM의 지형정보보다 부드러운 형태로 획득되었다. 본 실험에서

표 2. 실험 경로 및 월드거리모델 정보.

Table 2. World models of three experimental path.

경로명	길이(m)	프레임수	해상도	3차원 포인트수 (평균)
경로1	15	30	128x128	9229
경로2	15	30	256x256	57780
경로3	52.5	105	256x256	41100

는 가상 UGV를 세 종류의 경로를 따라 이동하면서 획득한 WRM을 사용하였다. ‘경로1’과 ‘경로2’는 직선 이동, ‘경로 3’은 직선이동과 회전을 포함하여 설정하였다.

그림 13은 ‘경로1’에 대한 개략등록의 결과를 보여준다. 그림 13(a)와 13(b)는 각각 WRM과 DSM에서 추출한 3차원 특징점을 보여준다. WRM은 UGV에서 획득한 첫 번째 프레임 사용하였다. WRM의 크기는 128×128, DSM의 크기는

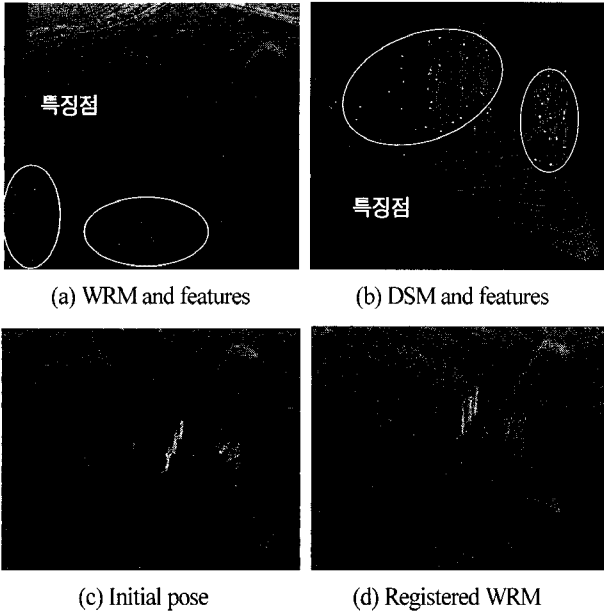


그림 13. ‘경로1’에 대한 개략등록의 결과.
Fig. 13. Results of ‘path1’.

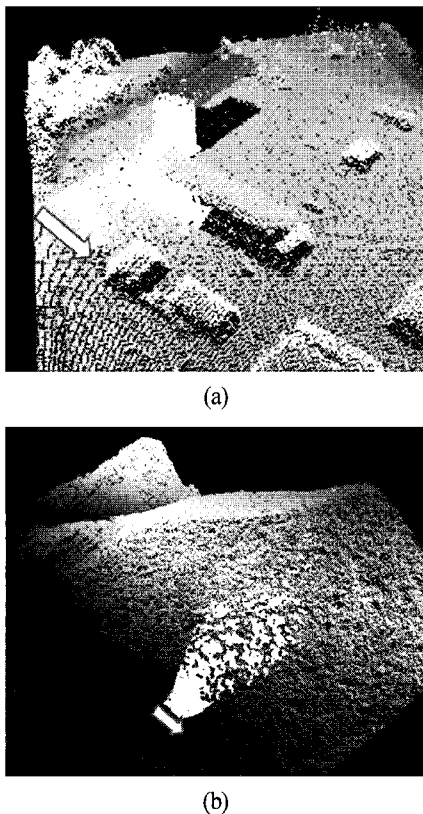


그림 14. (a) ‘경로1’ 및 (b) ‘경로2’의 DSM 등록 결과.
Fig. 14. Registration results of (a) ‘path1’ and (b) ‘path2’.

는 500×500이며 원래의 DSM을 샘플링하여 GSD를 0.5m로 줄였다. III 장에서 기술한 개략정합의 방법을 이용하여 그림 13(c)와 같이 초기오차가 주어졌을 때 정합의 결과를 그림 13(d)에 보였다. 등록 후 오차는 1.512m 이고 정밀등록 후의 오차는 0.246m 이다. 그림에서는 UGV에서 획득한 WRM이 DSM에 정확히 등록된 모습을 볼 수 있다.

개략등록된 첫 번째 WRM을 기준으로 이후 연속된 프레임 순서대로 등록하였다. 연속된 2개의 WRM을 차례로 등록하면 전체 프레임을 등록할 수 있다. 이 때 WtoW 등록만을 사용하여 첫 번째 프레임에서 마지막 프레임까지 등록하는 경우 앞 장에서 설명한 비와 같이 누적오차가 발생할 수 있다. 따라서 매 n 프레임마다 WtoD 등록을 실시하여 누적오차가 발생하지 않도록 하였다. 그림 14는 ‘경로 1’과 ‘경로2’의 등록 결과를 보여준다. 첫 번째 프레임에 대한 k번째 WRM의 변환행렬을 $T_k=[R_k|t_k]$ 라 할때 k번째 프레임의 위치오차 e_k 는 e_{0+t_k} 로 계산하였다. 그림 15에서는 ‘경로1’에 대한 위치오차를 보여준다. 모두 30 프레임에 대하여 WtoW만 사용한 경우, WtoW와 WtoD를 동시에 사용한 경우에 대한 결과를 출력하였다. WtoW와 WtoD를 사용한 경우에 대해서는 매 3프레임 또는 5프레임에 WtoD를 실행한 결과를 보이고 있으나 유사한 결과를 얻을 수 있었다. 이는 WtoD를 자주 사용하는 것이 좋은 결과를 얻기보다는

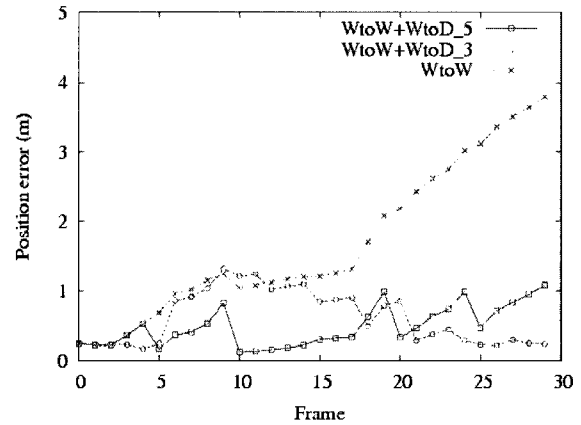


그림 15. ‘경로1’에 대한 UGV위치오차.
Fig. 15. Position error of UGV at ‘path1’.

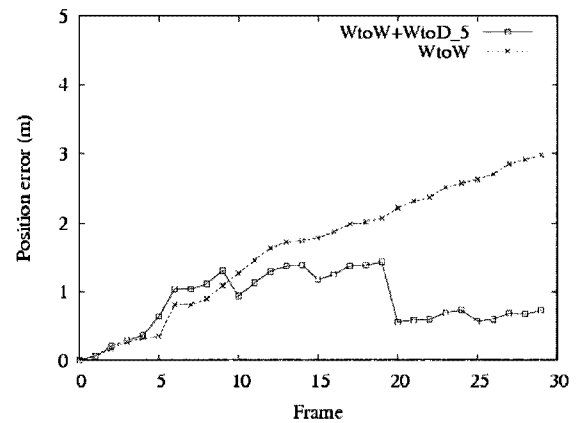


그림 16. ‘경로2’에 대한 UGV위치오차.
Fig. 16. Position error of UGV at ‘path2’.

표 3. 개략등록 및 정제등록의 수행 속도.

Table 3. Processing time of coarse registration and refinement.

경로명	개략등록 (sec)	정제등록 (sec/frame)
경로1	21	0.093
경로2	32	0.532
경로3	25	0.391

WtoD를 사용하지 않는 프레임에서의 WtoW의 결과가 전체 성능에 영향을 미치지 않기 때문에 분석된다.

세 번째 실험은 낮은 건물과 나무들로 구성된 평탄한 지역에 대하여 70m를 이동하는 경로에 대하여 실시하였다. UGV가 직선으로 이동하다가 건물에 가까워지면 이동 방향을 변경하였다. UGV의 이동방향을 2번의 변경하여 총 105 프레임의 WRM을 획득하였다. 매 0.5m 마다 획득된 WRM을 연속적으로 이전 프레임에 등록하였고, 매 3프레임 또는 5프레임 마다 WRM을 DSM에 등록하였다. 그림 17은 DSM에 등록된 105개의 WRM을 동시에 출력하였다. 화살표는 UGV의 이동경로를 보여주고 흰색으로 표시된 부분이 WRM이 등록된 결과를 보여준다. 그림 18은 각 프레임에 대한 UGV의 위치오차를 보여준다. 연속된 2장의 WRM만을 등록하는 경우는 프레임이 증가할수록 누적오차가 크게 발생하는 것을 알 수 있다. DSM을 이용하여 매 3프레임

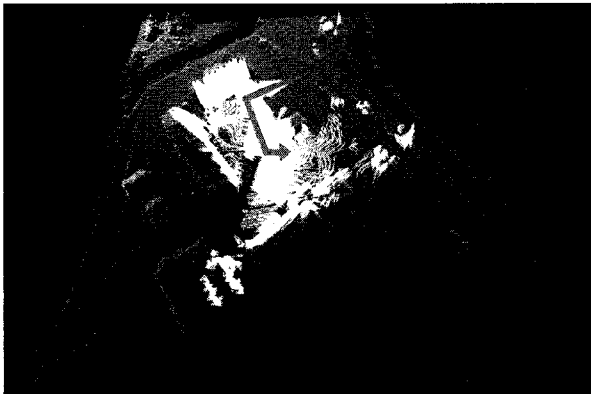


그림 17. '경로3'에 대한 DSM 등록 결과.

Fig. 17. Registration results of world models at 'path3'.

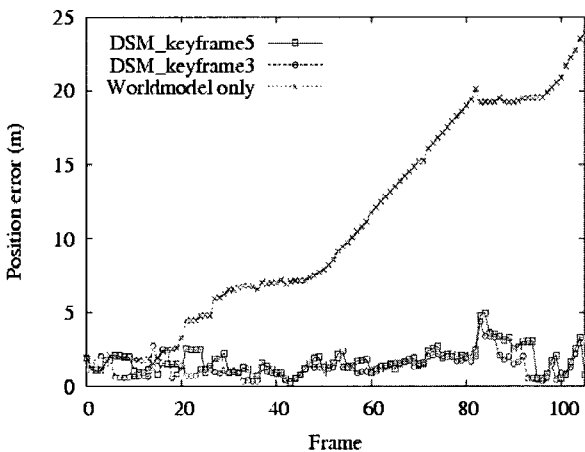


그림 18. '경로3'에 대한 UGV의 위치오차.

Fig. 18. Position error of UGV at 'path3'.

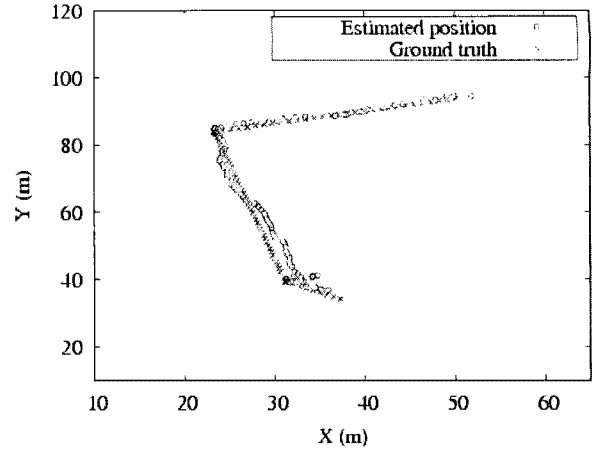


그림 19. 추정된 UGV위치와 Ground truth 비교.

Fig. 19. Comparison of estimated position and ground truth.

또는 5프레임에 정합한 결과는 오차가 낮게 나오는 것을 알 수 있다. 하지만 직선으로 이동하는 UGV의 위치오차보다 크게 나타남을 알 수 있다. 그림 19에서는 XY 평면에 출력된 UGV의 위치를 Ground truth와 함께 보여주고 있다. 실험환경이 고도차가 거의 없는 지형이기 때문에 고도값에 해당하는 Z축은 출력하지 않았다. 이동초기에는 거의 오차가 발생하지 않음을 알 수 있고 회전이 발생한 이후 위치 오차가 조금 커진 것을 알 수 있다.

VI. 결론

본 논문에서는 3차원 디지털 지형정보를 이용하여 이동하는 UGV의 위치인식에 대한 기술을 소개하였다. 논문에서는 UGV에 장착된 3차원 거리센서를 사용하여 UGV의 주변지형에 대한 월드모델을 생성하고 이를 DSM에 등록하여 UGV의 위치를 추정하는 방법을 제안하였다. UGV의 초기 위치를 추정하기 위하여 FRSM 방법을 제안하였으며 이동하는 UGV에 대한 연속적 위치인식을 위하여 비특징기반 3차원 정제등록 기술을 사용하였다. 추정 위치에 대한 누적 오차를 줄이기 위하여 월드모델 및 DSM 사이의 정제등록을 반복적으로 실시하는 방법을 제안하였다.

본 논문에서는 실측 DSM을 사용하여 UGV의 이동실험을 수행할 수 있도록 가상환경을 구축하였다. 가상 UGV의 3차원 센서는 실제 사용할 센서의 사양에 따라 모델링하였으며 가상 UGV의 이동방향과 센서의 방향 등을 모델링 후 월드모델을 획득하였다. 가상환경에서의 생성한 세 개의 경로에 대한 실험 결과 짧은 경로에서는 평균 1.0m 이하의 오차, 긴경로에서는 약 1.3m의 평균오차를 보였다.

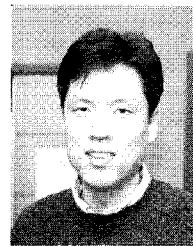
참고문헌

[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] K. Arun, T. Huang, and S. Bolstein, "Least-squares fitting of two 3-d point sets," *IEEE Transactions on*

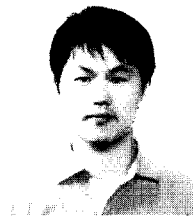
- Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 9, no. 5, pp. 698-700, 1987.
- [3] P. Besl and N. McKay, "A method for registration of 3D shapes," *IEEE Trans. PAMI*, vol. 14, no. 2, pp. 239-256, 1992.
- [4] G. Blais and M. Levine, "Registering multiview range data to create 3D computer object," *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 17, no. 8, 1995.
- [5] Y. Chen and G. Medioni, "Object modelling by registration of multiple range images," vol. 10, no. 3, pp. 145-155, 1992.
- [6] A. Downs, R. Madhavan, and T. Hong, "Registration of range data from unmanned aerial and ground vehicles," *Proceedings of Applied Imagery Pattern Recognition Workshop*, pp. 45-50, 2003.
- [7] A. Johnson, "Spin-images: a representation for 3-D surface matching," Ph.D. Thesis, CMU, 1997.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] R. Madhavan and E. Messina, "Iterative registration of 3d lidar data for autonomous navigation," *In Proceedings of the IEEE Intelligent Vehicles Symp*, pp. 186-191, 2003.
- [11] R. Madhavan and E. Messina, "Performance evaluation of temporal range registration for unmanned vehicle navigation," *Integrated Computer-Aided Engineering*, vol. 12, no. 3, pp. 291-303, 2005.
- [12] M. Montemerlo, S. Thrun, D. Koller, and B. Webreit, "FastSLAM: A factored solution to the simultaneous localization and mapping problem," *Proceedings of the AAAI National Conference on Artificial Intelligence*, 2002.
- [13] S. Y. Park and M. Subbarao, "An accurate and fast point-to-plane registration technique," *Pattern Recognition Letter*, vol. 24, no. 16, pp. 2967-2976, 2003.
- [14] 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.
- [15] Y. Sun and M. A. Abidi, "Surface matching by 3D point's fingerprint," *Proc. IEEE International Conference on Computer Vision*, vol. II, pp. 263-269, 2001.
- [16] N. Vandapel and M. Hebert, "3D Rover localization in airborne lidar data," *International Symposium on Experimental Robotics*, July 2002.

- [17] N. Vandapel, R. Raghavendra, R. Donamukkala, and M. Hebert, "Unmanned ground vehicle navigation using aerial lidar data," *The International Journal of Robotics Research*, vol. 25, no. 1, pp. 31-51, 2006.
- [18] S. Winkelbach, M. Rilk, C. Schonfelder, and F. M. Wahl, "Fast random sample matching of 3D fragments," *Pattern Recognition*, LNCS, 3175, pp. 129-136, 2004.
- [19] A. Zhang S. Hu X. Jin, and W. Sun, "A method of merging aerial images and ground laser scans," *Proceedings of International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 2005.



박순용

1991년 경북대학교 전자공학과(공학사). 1993년 경북대학교 전자공학과(공학석사). 2003년 미국 뉴욕주립대학교 스토니브룩(공학박사). 1993년~1999년 한국원자력 연구소 로봇개발연구실 선임연구원. 2004년~2005년 한국전자통신연구원 디지털콘텐츠연구단 선임연구원. 2005년~현재 경북대학교 컴퓨터공학부 조교수. 관심분야는 3차원복원, 3차원정합, 로봇비전, 입체영상.



최성인

2007년 금오공과대학교 컴퓨터공학부(공학사). 2007년~현재 경북대학교 전자전기컴퓨터학부 석사과정 재학 중. 관심분야는 실시간 3차원 정합 및 복원, 로봇비전, 영상처리.



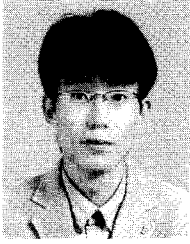
장재석

2007년 경북대학교 컴퓨터공학과(공학사). 2009년 경북대학교 전자전기컴퓨터학부(공학석사). 2009년~현재 경북대학교 전자전기컴퓨터학부 박사과정 재학 중. 관심분야는 컴퓨터비전을 이용한 3차원 건물 복원.



정순기

1990년 경북대학교 컴퓨터공학과(공학사). 1992년 한국과학기술원 전산학과(이학석사). 1997년 한국과학기술원 전산학과(공학박사). 1997년~1998년 University of Maryland, Research Associate. 2001년~2002년 IRIS, University of Southern California, Research Associate. 1998년~현재 경북대학교 컴퓨터공학과 교수. 1999년~현재 (주)아이디스 기술고문. 관심분야는 가상현실, 증강현실, 컴퓨터비전, 영상처리, 컴퓨터그래픽스.



김 준

2003년 경북대학교 전자전기공학부(공학사). 2005년 경북대학교 전자공학과(공학석사). 2005년~현재 국방과학연구소 무인자율화연구실험실 선임 연구원. 관심분야는 무인시스템의 아키텍처 설계, 레이저 레이더 기반 3차원 지형 모델링, 지형모델 기반 위치 보정.



채 정 숙

1999년 목원대학교 컴퓨터공학과(공학사). 2002년 동국대학교 컴퓨터공학과(공학석사). 2002년~2007년 전자통신연구원 우정기술연구센터 연구원. 2007년~현재 국방과학연구소 무인자율화연구실험실 연구원. 관심분야는 무인자율시스템의 아키텍처 설계, 로봇비전, 실시간 3차원 센서데이터 융합 및 복원.