

키넥트 거리센서를 이용한 실내 이동로봇의 위치인식 및 3 차원 다각평면 지도 작성

Localization and 3D Polygon Map Building Method with Kinect Depth Sensor for Indoor Mobile Robots

권대현*, 김병국
(Dae-Hyeon Gwon^{1,*} and Byung-Kook Kim¹)

¹School of Electrical Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology (KAIST)

Abstract: We suggest an efficient Simultaneous Localization and 3D Polygon Map Building (SLAM) method with Kinect depth sensor for mobile robots in indoor environments. In this method, Kinect depth data is separated into row planes so that scan line segments are on each row plane. After grouping all scan line segments from all row planes into line groups, a set of 3D Scan polygons are fitted from each line group. A map matching algorithm then figures out pairs of scan polygons and existing map polygons in 3D, and localization is performed to record correct pose of the mobile robot. For 3D map-building, each 3D map polygon is created or updated by merging each matched 3D scan polygon, which considers scan and map edges efficiently. The validity of the proposed 3D SLAM algorithm is revealed via experiments.

Keywords: 3D map building, SLAM, 3D polygon map, Kinect, row plane, bidirectional line segmentation, mobile robot

I. 서론

자율 주행 로봇은 인간을 대신하여 공장의 생산라인에서 제품을 조립, 우주를 탐사, 그리고 지뢰와 같은 폭발물을 탐지하는 등의 작업들을 수행한다. 이외에도 로봇의 응용분야는 끝없이 많으며 폭발적으로 증가하고 있다[10-14].

이동 로봇은 자율 업무 수행을 위하여 원하는 최종 위치까지 안전하게 도달할 수 있어야 한다(navigation). 그 때문에 이동 로봇은 로봇 그 자신의 현재위치를 파악할 수 있어야 한다(localization). 위치 추정이 되지 않으면 아무리 목적지가 주어진다 할지라도 현재 자신의 위치를 모르므로 앞으로 나아가는 것이 무의미하기 때문이다[15,16].

이동 로봇은 지도와 같은 주변 환경에 대한 정보가 주어지지 않더라도 자신의 임무를 수행할 수 있어야 한다. 이때 이동 로봇은 자신의 위치를 추정하는 동시에 주변 환경에 대한 정보를 수집하여 지도를 작성하여야 하는데 이와 같은 문제는 SLAM (Simultaneous Localization and Mapping) 혹은 CML (Concurrent Mapping and Localization)이라 불리고 있다. 평면 영역 검출 연구는 다양한 센서를 활용하여 많이 진행되었고 [1,2], 키넥트(Kinect) 센서를 이용한 연구도 진행되어 왔다. 평면 영역 검출을 위한 대표적인 방법은 하프 변환(Hough-transformation) [3], RANSAC (Random sample consensus) [4], 법선 벡터(normal vector) [5] 이용 등이 있다.

하프 변환 [3]을 이용한 평면 영역 검출은 x-y-z 좌표에서의 데이터를 원점과의 수직 거리와 평면의 회전각을 나타내

는 하프 파라미터 공간으로 변환하여 나타낸 후, 하프 파라미터 공간에서 최댓값을 찾아 x-y-z 좌표에서의 평면을 검출한다. 잡음(noise)이 많은 환경에서 정확한 검출이 가능한 장점이 있지만, 많은 메모리 공간이 필요하고, 연산 속도가 느린 단점이 있다. 평면 검출은 Honda의 ASIMO와 같은 2족 보행 로봇에 적용되어 계단 주행과 장애물 회피 등에 성공적으로 적용되었다[4].

본 연구는 키넥트 센서를 이용한 실내 환경에서의 3차원 다각 평면 기반의 지도 작성을 목적으로 하고 있다. 실내 환경은 대부분 평면으로 구성되어 있으므로, 법선 벡터에 의한 평면 추출을 기반으로 구성된 3차원 다각형 (해당 모서리 들을 포함한) 지도를 작성하며, 키넥트 센서와 엔코더 (encoder) 센서만 이용하여 연산 시간이 빠르고 메모리 효율적이면서 정확도가 높은 3차원 지도를 작성하는게 본 연구의 목적이다. 제안한 방법들을 검증하기 위하여 Pioneer 3-AT 이동 로봇에 키넥트 센서를 장착하여 실내환경에서의 다양한 실험 또한 수행하였다.

본 논문은 다음과 같이 구성되었다. 먼저 II장에서 하드웨어 구조와 소프트웨어 구조를 소개한다. III장에서는 다각 평면 기반의 위치 추정 및 3차원 지도 작성 알고리즘에 대해서 설명하고, IV장에서는 지도제작 알고리즘의 실험 결과에 대해서 설명한다. V장에서는 결론에 대해서 다룬다.

II. 하드웨어 구조와 소프트웨어 구조

1. 하드웨어 전체 구조도

본 연구를 위한 하드웨어 구조는 그림 1과 같다. 키넥트와 노트북은 pioneer 3-AT 몸체 위에 고정시켰다. 키넥트가 동작하려면 전원이 필요하므로 pioneer 내부의 배터리에서 전압 레귤레이터를 이용해 안정적인 전원이 공급되도록 하였다. 키넥트는 노트북과 USB로 연결되어 거리, 영상 데이터를 전

* Corresponding Author

Manuscript received February 2, 2016 / revised May 27, 2016 / accepted July 13, 2016

권대현, 김병국: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과
(kdhx13@kaist.ac.kr/bkkim@kaist.ac.kr)

※ 본 연구는 권대현에 의하여 연구되었음.

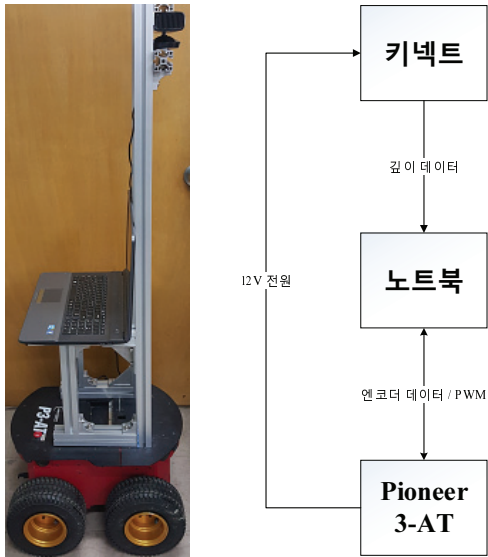


그림 1. 하드웨어 전체 구조도 사진.
Fig. 1. Picture of total hardware structure.

송한다. 마지막으로 pioneer는 SH2 마이크로컨트롤러가 있어 주행 입력에 따라 생성된 PWM을 모터에 인가하고, 엔코더로부터 모터 회전량을 읽어 노트북에 전송한다. 노트북과는 시리얼 통신을 통해 데이터 입출력이 이루어진다.

키넥트 센서로부터 얻은 데이터를 스캔데이터라 정의했다. 스캔데이터에서 선분 추출을 하였고, 선분의 시작점과 끝점을 정의해 줄 수 있으며 이러한 선분을 스캔 벡터라 정의하여 활용하였다. 로봇이 이동하면서 연속적인 스캔을 하면서도 스캔 벡터가 추출된다. 본 연구는 이를 이용하여 연속적인 스캔 데이터에서 추출된 스캔 벡터들을 모아 다각 평면을 구성하도록 하였다.

1.1 이동 로봇 pioneer 3-AT

이동 로봇으로 위와 같은 pioneer 3-AT 를 사용 하였다.

1.2 키넥트 센서

2. 소프트웨어 전체 구조도

연구를 위한 하드웨어 구조는 그림 2과 같다.

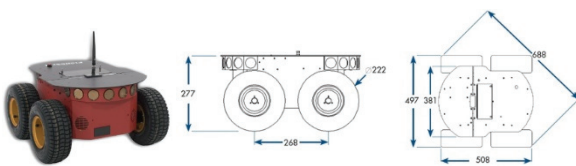


그림 2. 이동 로봇 사진 및 규격.
Fig. 2. Picture of mobile robot and size.

표 1. 이동 로봇 pioneer 3-AT 상세 스펙.

Table 1. Detail specification of mobile robot pioneer 3-AT.

규격	508 mm * 497 mm * 277 mm
중량, 한계 중량	12 kg, 30 kg
최대 속도	전진 속도: 0.7 m/s
	회전 속도 : 2.4 rad/s
배터리	12 V 7.2 Ah * 3, 2-4 hous
운전 타입	스키드 조향 운전

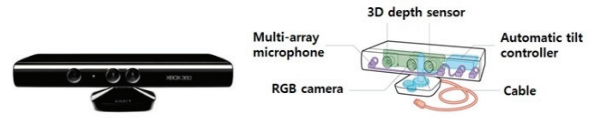


그림 3. 키넥트 센서 사진.
Fig. 3. Picture of Kinect sensor.

표 2. 키넥트 센서 상세 스펙.

Table 2. Detail specification of Kinect sensor.

물리량	값
수평, 수직 측정 범위	57°, 43°
기울임 최대 한계 각도	±27°
깊이 측정 거리 한도	1.2m ~ 3.5m
깊이 카메라 스펙	640 pixel × 480 pixel, 16bit, 30FPS
RGB 카메라 스펙	640 pixel × 480 pixel, 48bit, 30FPS

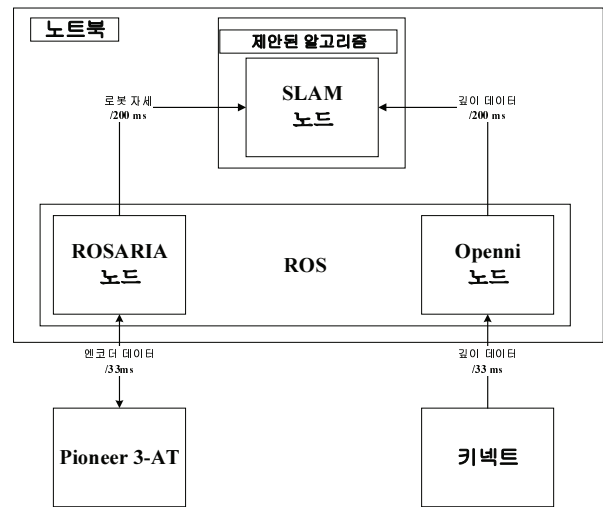


그림 4. 소프트웨어 전체 구조도 사진.
Fig. 4. Picture of total software structure.

소프트웨어는 리눅스 기반의 우분투 12.04 LTS 운영체제에서 C++ 언어를 이용하여 구현하였다. 소프트웨어 제작에 있어 ROS (Robot Operating System) 라는 미들 웨어를 사용하여 메시지 센서와 로봇 간 통신에 사용하였다. ROSARIA 노드는 pioneer를 구동, Openni 노드는 키넥트를 사용하기 위한 장치 드라이버 노드, SLAM 노드는 본 논문에서 제안한 알고리즘을 구현한 것이다.

이동 로봇을 주행하여 그 실험데이터는 ROSbag 으로 저장하였다. ROSbag 을 재생시켜서 그 데이터를 SLAM 노드에서 처리하여 SLAM 결과를 얻었다.

III. 다각평면 기반의 위치추정 및 3차원 지도 작성 알고리즘

제안된 전체적인 위치인식 및 3차원 지도작성 알고리즘에 대해서 설명한다. 매 시간 단계마다 다음과 같은 단계들을 수행한다.

- 단계 1: 추측 항법에 의한 로봇 pose 추정
- 단계 2: 3D 스캔 다각 평면 추출
- 단계 3: 3D 스캔 다각 평면과 맵 다각 평면 매칭

단계 4: 이동로봇의 2D 위치 추정

단계 5: 3D 스캔 다각 평면과 맵 다각 평면들을 이용한 다각 평면 기반 지도작성

전체적인 알고리즘의 단계 및 세부 입출력을 흐름도로 나타내면 그림 3와 같이 나타낼 수 있다.

그림 5와 같은 알고리즘에서 단계 2의 세부 단계 중 하나인 스캔 벡터와 양 끝점 거리를 이용한 스캔 선분 그룹핑, 단계 3. 3D 스캔 다각 평면과 맵 다각 평면 매칭, 단계 5. 3D 스캔 다각 평면과 맵 다각 평면들을 이용한 다각 평면 기반 지도작성 에서 본 논문에서 제안한 알고리즘들이 사용되었다.

1. 단계 1: 추측 항법에 의한 로봇 pose 추정

$$\begin{bmatrix} x((k+1)T) \\ y((k+1)T) \\ \theta((k+1)T) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x(kT) \\ y(kT) \\ \theta(kT) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{r'}{2} \cos(\theta(kT)) & \frac{r'}{2} \cos(\theta(kT)) \\ \frac{r'}{2} \sin(\theta(kT)) & \frac{r'}{2} \sin(\theta(kT)) \\ r' & -r' \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Tw_r(kT) \\ Tw_l(kT) \end{bmatrix} \quad (1)$$

이동로봇인 pioneer 3-AT 에 대한 4-wheeled skid steering drive mobile robot의 기구학을 적용하였고, 컴퓨터 계산을 위하여 위와 같이 이산시간의 식을 사용하였다.

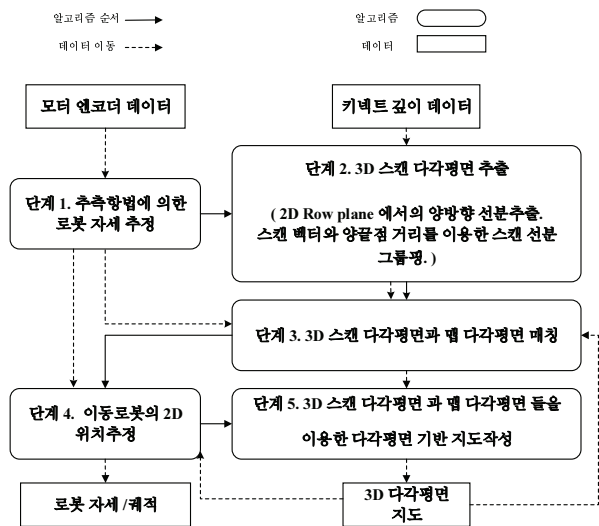


그림 5. 전체적인 지도제작 알고리즘 흐름.
Fig. 5. Overall Algorithm flow of map building.

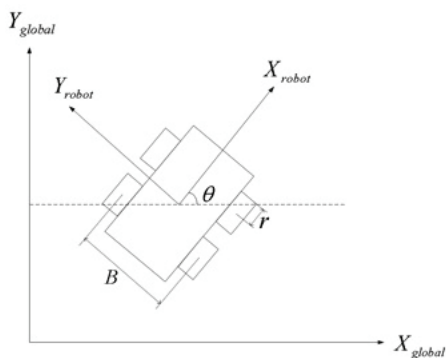


그림 6. 네바퀴 스키드 조향 이동 로봇 좌표계.
Fig. 6. 4-wheeled skid steering drive mobile robot coordinate.

$[x \ y \ \theta]$ 는 로봇의 3자유도 자세이다.

r', w_r, w_l, α 는 각각 이동 로봇 바퀴 반지름, 오른쪽 바퀴 각속도, 왼쪽 바퀴 각속도, 바퀴 마찰 상수이다. k, T 는 각각 이산 시간 계수와 엔코더 샘플링 시간이다. 이산 시간 계수는 양의 정수이며, 엔코더 샘플링 시간은 키넥트 깊이 데이터 획득 시간에 맞추어 $T = 33 [ms]$ 이다.

2. 단계 2: 3D 스캔 다각평면 추출

단계 2. 3D 스캔 다각 평면 추출은 다음과 같은 세부 단계로 구성되어있다.

단계 2.1. 2D 행 평면[5]상에서 양방향 선분 추출[6]. 이 단계는 3D 점군을 2D 평면인 행 평면[5] 480개로 분리하여 각각의 행 평면[5] 상에서 양방향 선분 추출[6]을 진행하는 단계이다.

단계 2.2. 2D 행 평면[5]상 선분들의 (3D) 전역 좌표계로의 변환. 이 단계는 선분 추출된 선분들을 3차원 전역 좌표계로 변환하는 단계이다. 이동 로봇의 구조를 적용하여 동형 변환을 적용한다.

단계 2.3. 특이값 분해를 사용한 (3D) 무한 평면 추출. 이 단계는 선분들로부터 평면 추출을 하는 단계이다. 선분과 평면 사이의 최소 제곱 오차가 되도록 평면 추출을 수행한다. 단계 2.3은 다음과 같은 2가지 세부 단계로 구성된다.

단계 2.3.1. 3D 스캔 선분의 방향 벡터와 양 끝점 거리를 이용한 스캔 선분 그룹핑.

단계 2.3.2. 특이값 분해를 사용한 3D 무한 평면 추출[7].

단계 2.4. 3D 스캔 다각 평면 추출. 이 단계는 선분들과 평면으로부터 다각 평면을 추출하는 단계이다. 선분들을 평면 위로 이동시키고 그 3D 평면을 2D 좌표계로 변환하여 2D에서 양방향 선분 추출[6]을 사용하여 2D 다각 평면을 구성한 뒤 다시 3D 전역 좌표계로 변환해 주어 3D 다각 평면을 얻게된다.

위 단계 중 단계 2.3.1. 3D 스캔 선분의 방향 벡터와 양 끝점 거리를 이용한 스캔 선분 그룹핑 단계에서 제안된 알고리

표 3. 스캔 선분 그룹핑 알고리즘.
Table 3. Algorithm of scan line grouping.

<p>알고리즘 1. 스캔 선분 그룹핑</p> <p>입력: 행 평면으로 분류된 스캔 선분들</p> <p>출력: 그룹으로 분류된 스캔 선분들.</p> <p>while (모든 행 평면에 대하여 탐색.)</p> <p> 그룹 및 기준 선분의 선택.</p> <p> NI = 현재 행 평면의 스캔 선분의 갯수</p> <p> for (I=0; I < NI; I++)</p> <p> if (그룹핑 이 되지 않은 스캔 선분일 경우)</p> <p> 비교선분을 선택.</p> <p> 기준선분과 비교선분 간의 거리와 각도 계산.</p> <p> $\theta_g < 10^\circ$ and $d_g < 0.1 m$</p> <p> if (거리 와 각도 임계값들을 모두 만족)</p> <p> 비교선분을 기준선분의 그룹 에 포함. break</p> <p> end if</p> <p> end if</p> <p> end for</p> <p> end while</p>

즘이 사용되었고 다음과 같다.

기준선분의 양끝점을 3차원벡터 s_{p1}, e_{p1} 라 하고 단위방향 벡터를 $v_1 = \frac{(s_{p1}-e_{p1})}{norm(s_{p1}-e_{p1})}$ 라고 정의하자. 마찬가지로, 비교선분의 양끝점을 s_{p2}, e_{p2} 라 하고 단위방향벡터를 $v_2 = \frac{(s_{p2}-e_{p2})}{norm(s_{p2}-e_{p2})}$ 라고 정의하면 다음과 같이 스캔 선분 그룹핑 조건을 표현할 수 있다.

$$\theta_g < 10^\circ \text{ and } d_g < 0.1 \text{ m}$$

$$\theta_g = \tan^{-1}(\|v_1 \times v_2\| \mid v_1 \cdot v_2)$$

$$d_g = \min(d_1, d_2, d_3, d_4) \quad (2)$$

$$d_1 = norm(s_{p1} - s_{p2}), d_2 = norm(s_{p1} - e_{p2}),$$

$$d_3 = norm(e_{p1} - s_{p2}), d_4 = norm(e_{p1} - e_{p2})$$

선분 사이각도 임계값 조건과 양끝점 유클리디안 거리의 임계값 조건을 둘 다 만족하면 두 선분이 같은 그룹이 된다.

제안된 그룹핑 알고리즘이 정경우[5]가 제안한 알고리즘에 비하여 향상된 것은 다음과 같다.

구조체 배열에 모든 스캔 선분을 저장한다. 이때, 포인터 배열을 선언하여 각 행평면의 첫 번째 스캔 선분을 가리키도록 한다. 그룹핑 알고리즘이 각 행평면의 첫 번째 스캔 선분을 기점으로 각 행평면에 대하여 탐색하므로, 그림 7과 같이 포인터로 지정해두면 그룹핑 탐색 속도를 향상시킬 수 있다. 또한, 하나의 행평면에는 서로 다른 그룹으로 분류될 선분들만 있다고 가정했다. 이것은 실내환경과 같이 수평 수직 평

면이 명확히 구분되는 기하학적 특성 때문에 충분히 가능하다. 따라서 그림 7과 같이 첫 번째 행평면의 두번째 스캔 선분과 두번째 행평면의 첫 번째 스캔 선분이 그룹핑 된 순간, break 문에 의하여 루프를 빠져나온다. 즉, 그룹핑에 성공하면 두번째 행평면의 남은 스캔 선분들은 다른 그룹에 속할 선분들로 가정하여 대한 탐색을 하지 않으므로 탐색량을 줄여 속도를 향상 시켰다.

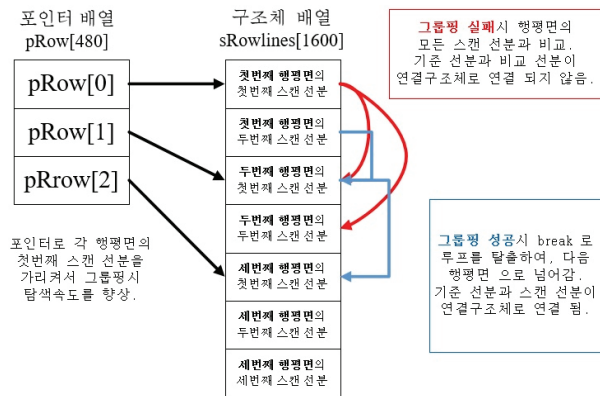
추출된 선분의 자료구조가 연결리스트 이므로, 그룹핑 단계에서 자주 사용되는 삽입과 삭제가 선형 구조체 배열에 비하여 빠르다. 또한, 정경우[5]가 제안한 그룹핑 알고리즘 동일한 행 평면[5]에서 추출된 선분들 간에도 그룹핑 여부를 판별한다. 반면에, 제안된 알고리즘은 동일한 행 평면[5]에서 추출된 선분들은 서로 다른 그룹이 된다 가정하여 그 선분들 간에는 그룹핑 여부를 판별하지 않는다. 따라서 정경우[5] 알고리즘에 비하여 그룹핑 판별 횟수가 적으면서도 효율적인 그룹핑이 가능하다. 위와 같이 그룹핑 된 선분 그룹로 무한 평면을 추출한다.

단계 2.3. 특이값 분해를 사용한 3D 무한평면 추출 단계 [7]에서 정경우 [5] 논문에서는 선분이 3개 이상 모이면 초기 평면추출을 수행하고, 그 초기평면을 새로운 선분과 비교하여 무한평면을 점점 갱신하는 방식이다. 즉, 하나의 선분 그룹에 대하여 여러번 평면 추출을 하여 알고리즘 속도가 떨어지는 단점이 있다. 반면에, 제안된 논문의 경우 한 프레임, 의 전체 선분들에 대하여 그룹핑을 완전히 마친 후에, 하나의 선분 그룹이 하나의 무한평면으로 추출된다. 하나의 선분 그룹에 대하여 한 번만 평면 추출을 하여 알고리즘 속도가 빠르다는 장점이 있다. 이러한 알고리즘 속도 향상은 3종류의 실내 실험에 의하여 검증되었다.

3. 단계 3: 3D 스캔 다각 평면과 맵 다각 평면 매칭

단계 3는 다음과 같은 세부 단계로 구성되어있다.

단계 3.1 다각 평면 매칭. 단계는 맵 다각 평면 과 스캔 다각 평면 간의 매칭 여부를 판별하는 단계이다. 두 다각평면 법선 벡터 사이 각도, 수직거리 합, 유클리디언 최소 거리를 비교하여 3가지 모든 임계값을 만족하면 맵 다각 평면과 스캔 다각 평면 이 매칭된 것으로 판별한다. 매칭된 다각 평면의 인덱스를 매칭 쌍에 저장한다. 단계 3.2 모서리 매칭. 단



연결리스트 pGroup[40] 연결리스트 자료구조를 사용하여 그룹선분의 삽입 및 삭제가 편리해짐

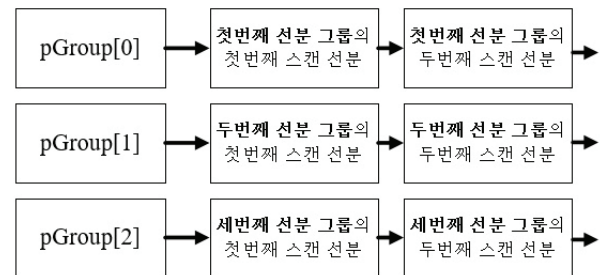


그림 7. 행평면과 그룹의 자료구조 및 그룹핑 설명. Fig. 7. Data structure of row planes and groups. Explanation of grouping.

표 4. 스캔 다각 평면과 맵 다각 평면 매칭 알고리즘.

Table 4. Algorithm of scan and map polygon matching.

알고리즘 2. 스캔 다각 평면과 맵 다각 평면 매칭	
입력:	스캔 다각 평면과 맵 다각 평면
출력:	매칭 쌍. 매칭된 스캔 다각 평면의 인덱스
for (모든 맵 다각 평면에 대하여 탐색.)	
for (모든 맵 스캔 평면에 대하여 탐색.)	
다각 평면 간의 거리와 각도 계산.	
$\theta_s < 5^\circ \text{ and } d_{s1} < 0.05 \text{ m and } d_{s2} < 0.05 \text{ m}$	
if (매칭 조건을 만족)	
매칭 쌍에 인덱스 정보 저장.	
end if	
end for	
end for	

계는 매칭된 맵 다각 평면과 스캔 다각 평면의 정확히 어떤 모서리가 이후에 통합될 모서리 (통합 모서리) 인지 판별하는 단계이다. 매칭된 모서리의 인덱스를 매칭 쌍에 저장한다.

스캔 다각평면의 꼭지점들을 3차원벡터 O_1^s, O_1^s 이 놓여있는 무한평면 P_1^s, P_1^s 의 법선벡터를 n_1^s 라고 하자. 마찬가지로, 맵 다각평면의 꼭지점들을 3차원벡터 O_1^m, O_1^m 이 놓여있는 무한평면 P_1^m, P_1^m 의 법선벡터를 n_1^m 라고 하자. 하면 다음과 같이 스캔 선분 그룹핑 조건을 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} \theta_s < 5^\circ \text{ and } d_{s1} < 0.05 \text{ m and } d_{s2} < 0.05 \text{ m} \\ \theta_s &= \tan^{-1}(\|n_1^s \times n_1^m\| \quad |n_1^s \cdot n_1^m|) \\ d_{s1} &= \text{avg}(\text{수직거리}(O_1^s, P_1^m)) \\ d_{s2} &= \min(\text{유클리디안거리}(O_1^s, O_1^m)) \end{aligned} \quad (3)$$

두 다각평면 법선벡터 사이각도 임계값 조건과 다각평면 꼭지점 유클리디안 거리의 임계값 조건 그리고 다각평면 수직 거리 임계 조건을 모두 만족하면 매칭이 수행된다.

정경우 [5]논문에서는 (1). 두 평면의 각도를 이용한 겹침 판별, (2). 맵 평면과 스캔 다각평면의 꼭지점들 사이의 수직 거리 합 를 이용하여 매칭 여부를 판별한다.

반면에, (1). 두 평면의 법선벡터 사이각, (2). 맵 평면과 스캔 다각평면의 꼭지점들 사이의 수직거리 합, (3). 스캔 다각평면의 꼭지점과 맵 다각평면의 꼭지점사이의 유클리디안 거리를 이용하여 매칭여부를 판별한다. 즉, 제안된 논문의 경우 3가지 조건을 만족해야만 매칭이 되므로 매칭이 더 정확해진다는 장점이 있다.

또한, 제안된 논문에서는 매칭된 스캔 다각평면의 모서리와 매칭된 맵 다각평면의 모서리 한 쌍을 모서리 쌍이라고 하여 이 모서리 쌍을 매칭단계에서 미리 찾음으로써 이후의 지도작성 단계에서 시간을 줄이게 된다.

4. 단계 4: 이동로봇의 2D 위치추정

이동 로봇의 위치 추정을 위해 본 연구에서는 손희진 [9]의 위치 추정방법을 사용하였다. 추출된 선분들을 다각평면들에 매칭하여 얻은 출력 중에서 추출 선분, 수직 다각평면 쌍이 이동 로봇의 위치 추정에 사용된다. 손희진 [9]의 위치 추정방법의 아이디어는 모든 추출 선분, 수직 다각평면 쌍에 대하여 추출 선분의 양 끝점에서 매칭된 수직 평면으로의 수직 거리 제곱의 합이 최소가 되는 이동 로봇의 최적 위치를 구하는 것이다.

스캔 선분 s_i 와 맵 수직 평면 m_k 가 매칭되었을 때 s_i 는 최적의 로봇 자세에서 관측된 스캔 선분 s_k 로 변환된다.

이때, 회전 변환 R_θ 와 위치 변환 T 는 현재 이동 로봇의 자세에서 최적의 자세로 가기 위한 변환이다. s_k 의 양 끝점에서 m_k 로의 수직 거리는 v_{k1}, v_{k2} 로 나타낸다. 그리고 좀 더 정확한 위치 추정을 위하여 v_{k1}, v_{k2} 각각의 제곱의 합에 추출 선분의 길이 l_k 추출 선분을 구성하는 점들의 개수 N_k , 그리고 표준 σ_k 로 구성된 가중치 $\frac{N_k}{\sigma_k} l_k$ 를 곱하여 비용함수를 구성하였다. 수직 평면들에 매칭 된 추출 선분 N 개에 대해서 비용 함수를 식으로 나타내면 다음과 같다.

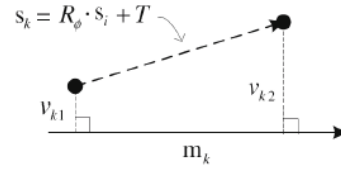


그림 8. 최적의 자세로 가기 위하여 변환된 스캔 선분과 수직 맵 평면.

Fig. 8. Transformed scan line for optimal robot pose and vertical map plane.

$$\begin{aligned} E &= \eta \cdot \sum_{k=1}^N \frac{N_k \cdot l_k}{\sigma_k} \sum_{j=1}^2 v_{kj}^2 \\ \eta &= \left(\sum_{k=1}^N \frac{N_k \cdot l_k}{\sigma_k} \right)^{-1} \end{aligned} \quad (4)$$

위의 비용함수를 최소화하는 회전 변환 R_θ 와 위치 변환 T 을 구하여 최적의 로봇 자세로 업데이트 하게 된다.

$$\begin{aligned} \tilde{x}_{k+1} &= R_\phi \tilde{x}_{k+1} + T \\ \tilde{\theta}_{k+1} &= \tilde{\theta}_{k+1} + \phi \\ \text{where,} \end{aligned} \quad (5)$$

$$R_\phi = \begin{bmatrix} \cos \phi & -\sin \phi \\ \sin \phi & \cos \phi \end{bmatrix}, \quad T = \begin{bmatrix} t_1 \\ t_2 \end{bmatrix}$$

5. 단계 5: 3D 스캔 다각평면 과 맵 다각평면 들을 이용한 다각평면 기반 지도작성

단계 5는 다음과 같은 세부단계로 구성되어있다

- 단계 5.1. 매칭되지 않은 3D 스캔 다각평면을 지도에 추가
- 단계 5.2. 3D 맵 무한평면을 업데이트
- 단계 5.3. 매칭된 3D 스캔 다각평면과 3D 맵 다각평면을 업데이트 된 3D 맵 무한평면에 사영
- 단계 5.4. 2D 선분 추출에 의한 모서리 쌍 병합
- 단계 5.5. 2D 외부 모서리 선택
- 단계 5.6. 2D 맵 모서리 확장에 의한 2D 다각평면 구성
- 단계 5.7. 2D 다각평면을 3D 다각평면 으로 동형변환하여 맵 다각평면 업데이트

위 과정에서 단계 5.3 을 자세히 설명하면 다음과 같다.

2D 선분 추출을 위해서는 2차원 좌표계가 필요하다. 2차원 좌표계를 구성하기 위해, 어떤 점을 원점으로 삼고 어떠한 방향들을 좌표계의 중심으로 정할지에 대한 문제가 생기게 된다. 본 연구에서는 해당 다각평면의 무게중심을 전역 좌표계의 원점과 일치시키고, 해당 다각평면의 법선 벡터 n_s 를 전역 좌표계 상의 x-y 평면과 일치시켜 다각형화를 진행하기 위한 지역 좌표계를 구성하였다.

이러한 방식으로 다각형화를 진행하기 위해서는 다음과 같은 과정이 필요하다.

- (1) 스캔 벡터들의 양 끝점을 다각평면으로 사영. 추출된 스캔 벡터들이 평면상에 존재하지 않기 때문에 스캔 벡터들의 양 끝점을 해당 다각평면으로 사영해준다.
- (2) 변환행렬 계산에서는 해당 다각평면의 법선 벡터 n_s

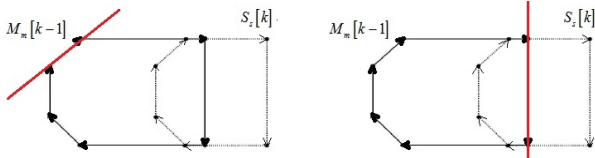


그림 9. 외부 모서리와 내부 모서리를 표현한 그림.
Fig. 9. Figure of outer edge and inner edge.

표 5. 외부 모서리와 내부 모서리를 구분 알고리즘.
Table 5. Algorithm of select outer and inner edge.

<p>알고리즘 3. 외부 모서리와 내부 모서리를 구분</p> <p>입력: 매칭된 스캔 다각평면과 맵 다각평면의 모서리 들</p> <p>출력: 외부모서리 의 index</p> <p>for (모든 맵, 스캔 모서리 에 대하여 탐색.)</p> <p> 기준 모서리 와 비교 모서리 설정.</p> <p> if (외부 모서리 로 판별)</p> <p> 외부 모서리 인덱스 정보 저장.</p> <p> end if</p> <p>end for</p>

를 전역 좌표계상의 xy-평면의 법선벡터와 일치시켜주는 회전행렬 R 을 구한다. 먼저, 해당 평면의 법선 벡터 n_s 와 xy-평면의 법선 벡터 사이의 각도 θ , 을 계산하고, 벡터의 외적을 이용하여 두 법선 벡터와 직교하는 벡터 u 를 찾는다. 회전축과 회전각도를 가지고 회전행렬 R 을 구할 수 있다.

다음으로 단계 5.5를 그림으로 표현하면 다음과 같다.

맵 다각평면의 모서리 $M_m[k-1]$ 또는 스캔 다각평면의 모서리 $S_s[k]$ 중에서 모서리의 순서대로 각 모서리를 무한 직선으로 보고 무한직선의 경계선의 오른쪽에 두 인접한 꼭지점들이 있으면 그 모서리를 외부 모서리로 본다. 두 인접 꼭지점들이 왼쪽에 있는 모서리는 내부 모서리으로써 2D 다각평면을 구성하지 않는다.

단계 5.6은 위에서 구한 외부 모서리와 단계 3에서 구한 통합 모서리들을 확장하여 그 모서리들 간 교점을 2D 다각평면의 꼭지점들로 사용한다.

단계 5.7은 단계 5.3에서 설명한 변환 행렬을 활용한다. 다만, 2D 데이터 ${}^p\mathbf{x} = [{}^px \quad {}^py]^T$ 에 ${}^pz = 0$ 를 추가하여 3D 으로 만든 후 적용해야 한다.

IV. 실험결과

본 논문에서는 3D 지도제작 실험을 위하여 Mobile Robots 사의 Pioneer 3-AT 모델에 microsoft 사의 키넥트 센서를 장착하여 사용하였다. 그리고 실험을 위하여 미들웨어인 ROS 와 Eigen 3.0 Library를 사용하여 C++ 언어로 소프트웨어를 구현하였다.

본 연구에서는 3차원 지도제작 알고리즘의 실험을 3가지 환경에서 진행하였다. 첫 번째로, 90도 회전구간을 포함한 실내환경으로써 전자과 1층 복도이다. 두번째로, 복잡한 실내환경으로써 전자과 2층 세미나실이다. 세번째로, 경사면을 포함한 복잡한 실내환경으로써, 전자과 1층 층계이다.

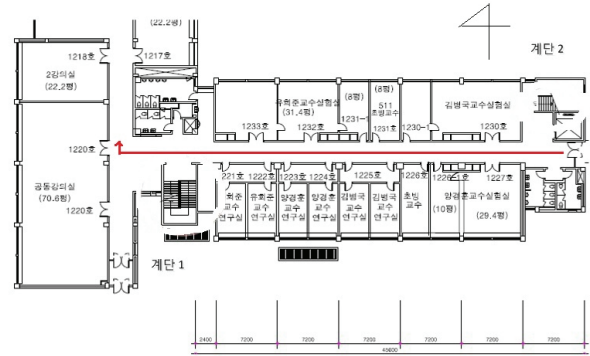


그림 10. KAIST 정보전자 공학동 1층 복도 평면도.
Fig. 10. Floor plan of the 1st floor of IE (Information & Electronics) bldg., KAIST.

지도의 오차는 도면을 기반으로 한 이상적 다각평면의 3차원 좌표를 참 값으로 하고 지도작성된 맵 다각평면의 3차원 좌표를 측정 값으로 하여 두 데이터 간 유클리디언 거리를 구하고, 다각평면별 오차를 구하여 이것의 평균 다각평면 오차를 구하였다.

또한, 수행시간은 하나의 맵 다각평면을 구성하는데 걸리는 시간을 다각평면에 대하여 평균을 낸 평균 수행시간이다.

1. 90도 회전구간을 포함한 실내환경

90도 회전구간을 포함한 실내환경의 실험장소로 한국과학기술원 정보전자공학동 1층 복도 일부에서 실험을 진행하였다. 첫 번째 실험에서는 다각평면이 모두 추출이 가능함을 검증하였다. 복도의 평면도는 그림 7과 같다.

평면도의 우측에서 출발하여 좌측의 90도 회전구간 까지 주행하면서 지도제작을 진행하였다. 그림 9는 작성된 3D 지도를 나타내었다.

2. 책상이 포함된 복잡하고 좁은 실내환경

책상이 포함된 복잡하고 좁은 실내환경에서 실험을 진행하였다. 한국과학기술원 정보전자공학동 2층 세미나실에서 실험을 진행하였다.

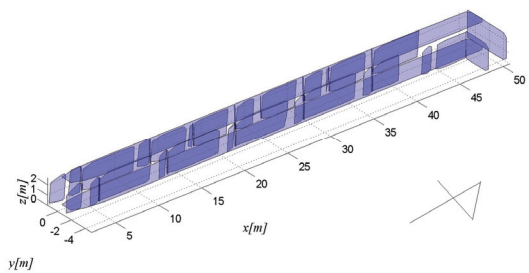


그림 11. 정보전자공학동 1층 복도의 3D 지도.
Fig. 11. 3D map of the 1st floor of IE bldg..

표 6. 실험1의 평균오차와 평균수행시간.

Table 6. Average error and processing time of experiment 1.

평균 다각평면 오차		
$(x, y, z) = (0.061 [m], 0.038[m], 0.052[m])$		
평균 수행시간		
정경우 [S]	본 논문	감소율
0.254 [sec]	0.157 [sec]	38%

3. 경사면을 포함한 복잡한 실내환경

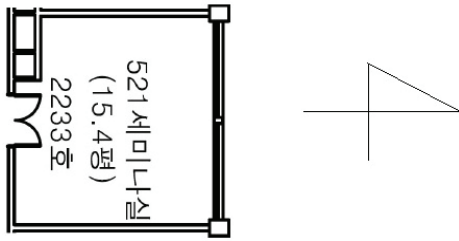


그림 12. 정보전자공학동 2층 세미나실의 평면도.
Fig. 12. Floor plan of the 2nd floor seminar room of IE bldg.,KAIST.

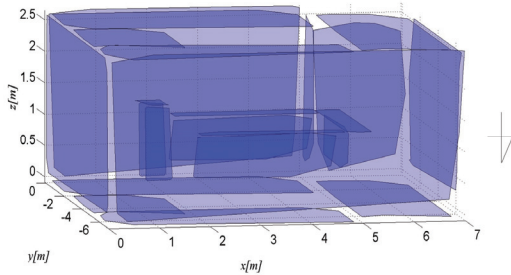


그림 13. 정보전자공학동 2층 세미나실 3D 지도.
Fig. 13. 3D map of the 2nd floor seminar room of IE bldg..

표 7. 실험2 평균오차와 평균수행시간.

Table 7. Average error and processing time of experiment 2.

평균 다각평면 오차		
$(x, y, z) = (0.055 [m], 0.043[m], 0.030[m])$		
평균 수행시간		
정경우[5]	본 논문	감소율
0.254 [sec]	0.145 [sec]	43%

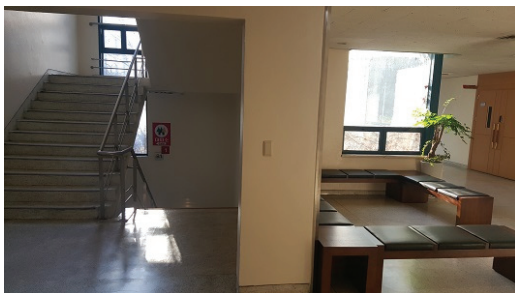


그림 14. 정보전자공학동 1층 계단과 복도 실제 사진.
Fig. 14. Picture of the 1st floor and stair of IE bldg..

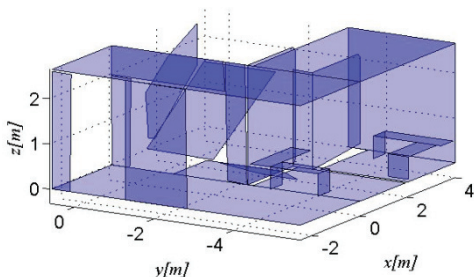


그림 15. 정보전자공학동 1층 계단과 복도의 3D 지도.
Fig. 15. 3D map of the 1st floor and stair of IE bldg..

표 8. 실험3의 평균오차와 평균수행시간.

Table 8. Average error and processing time of experiment 3.

평균 다각평면 오차		
$(x, y, z) = (0.015 [m], 0.033[m], 0.029[m])$		
평균 수행시간		
정경우 [5]	본 논문	감소율
0.254 [sec]	0.145 [sec]	43%

표 9. Young [8]에 의한 전자과 1층 계단 경사각 오차.

Table 9. Angle error of 1st floor stair by Young [8].

	참값	신영식 측정값 [8]	오차 [8]
계단	29°	30.43°	1.43°

표 10. 제안된 알고리즘에 의한 전자과 1층 계단 경사각 오차와 young [8]과의 상대 오차율.

Table 10. Angle error of 1st floor by proposed algorithm and compared with young [8].

	참값	본 논문	오차	[8] 대비 감소율
계단	29°	30.19°	1.19°	16.78%

V. 결론

본 연구에서는 키넥트 센서를 이용하여 실내 환경에서의 다각평면 기반의 3차원 지도제작 알고리즘을 제안하고 실제 도심 건물 환경의 지도를 제작하였다. 키넥트 센서를 사용한 3차원 지도제작과 관련된 대부분의 연구가 stop-and-go 형식의 이동으로 인해 로봇의 이동성에 제약을 받았는데 본 연구에서는 이를 극복하고자 하였다.

효율적인 그룹핑 알고리즘을 제안하여 정확하고 빠른 그룹핑을 구현하였다. 효율적인 매칭 방법을 제안하여 정확한 매칭이 가능하도록 하였다. 또한, 수직/수평/경사 다각평면의 구분 없이 임의의 다각평면에 대하여 지도를 제작하는 알고리즘을 제안하였다.

제안된 알고리즘의 실내 실험을 진행하였고 그 결과 알고리즘의 빠른 수행 및 동작을 검증할 수 있었다.

REFERENCES

- [1] J. Biswas and M. Veloso, "Planar polygon extraction and merging from depth images," *Intelligent Robots and Systems*, 2012.
- [2] J. W. Gates, M. Haseyama, and H. Kitajima, "Real-time polygon extraction from complex images," *International Symposium on Circuits and Systems*, vol. 5, 2000.
- [3] P. Hough, "Method and means for recognizing complex patterns," U.S. Patent, 3,069,654, 1962.
- [4] M. A. Fischler and R. C. Bolles, "Random sample consensus: a paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography," *Communications of the Association for Computing Machinery*, 1981.
- [5] K. W. Jung, "Research on 3D map building using Kinect sensor for mobile robots," MS. Thesis, Korea Advanced Institute of Science and Technology (in Korean), Daejeon, Republic of Korea, 49 pages, 2014.
- [6] G. W. Yoon, J. B. Kim, and B. K. Kim, "Method and apparatus for bidirectional line and arc segmentation of scan distance data for localization of mobile robots," KOREA Patent, Application

Number 10-2012-0005646, 2012.

- [7] K. Georgiev, R. T. Creed, and R. Lakaemper, "Fast plane extraction in 3D range data based on line segments," *Intelligent Robots and Systems*, pp. 3808-3815, 2011.
- [8] Y. S. Shin and B. K. Kim, "Planar polygon-based simultaneous localization and 3D map building for indoor mobile robots using 2D laser range finder," MS. Thesis, Korea Advanced Institute of Science and Technology (in Korean), Daejeon, Republic of Korea, 63 pages, 2014.
- [9] H. J. Sohn and B. K. Kim, "Vector-based localization and map building for mobile robots using laser range finders in an indoor environment," Ph.D. Thesis, Korea Advanced Institute of Science and Technology (in Korean), Daejeon, Republic of Korea, 169 pages, 2008.
- [10] S. E. Lee and B. K. Kim, "3D simultaneous localization and map building (SLAM) using a 2D laser range finder based on vertical/horizontal planar polygons," *Journal of Institute of Control, Robotics and System (in Korean)*, vol. 20, no. 11, pp. 1153-1163, 2014.
- [11] G. W. Yoon, J. B. Kim, and B. K. Kim, "Outdoor mobile robot localization algorithm using line/arc features based on laser range finders and 2½D map," *Journal of Institute of Control, Robotics and System (in Korean)*, vol. 18, no. 7, pp. 658-663, 2012.
- [12] D. H. Lee, H. G. Kim, and H. Myung, "Image feature-based real-time RGB-D 3D SLAM with GPU acceleration," *Journal of Institute of Control, Robotics and System (in Korean)*, vol. 19, no. 5, pp. 457-461, 2013.
- [13] J. B. Song and S. Y. Hwang, "Past and state-of-the-art SLAM technologies," *Journal of Institute of Control, Robotics and System (in Korean)*, vol. 20, no. 3, pp. 372-379, 2014.
- [14] Y. W. Choi, J. W. Choi, and S. G. Lee, "3D omni-directional vision SLAM using a fisheye lens laser scanner," *Journal of Institute of Control, Robotics and System (in Korean)*, vol. 21, no. 7, pp. 634-640, 2015.
- [15] Y. S. Jeon, J. E. Choi, and J. O. Lee, "Development of a SLAM system for small UAVs in indoor environments using gaussian processes," *Journal of Institute of Control, Robotics and System (in Korean)*, vol. 20, no. 11, pp. 1098-1102, 2014.
- [16] R. J. Yan, Y. S. Choi, J. Wu, and C. S. Han, "Arc/line segments-based SLAM by updating accumulated sensor data," *Journal of Institute of Control, Robotics and System (in Korean)*, vol. 21, no. 10, pp. 936-943, 2015.



권대현

2014년 한양대학교 전기공학과 졸업. 2016년 한국과학기술원 전기 및 전자공학 석사 졸업. 2016년~현재 동 대학원 건설 및 환경공학과 박사과정 재학 중. 관심분야는 이동 로봇, SLAM.



김병국

1975년 서울대학교 전자공학과 졸업. 1977년 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 석사. 1981년 동 대학원 박사. 1981년~1986년 우진계기(주) 연구실장. 1982년~1984년 University of Michigan 방문연구. 1986년~현재 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 교수. 관심분야는 실시간 시스템, 로봇틱스, 임베디드 제어.