

# 다수 3 차원 라이다 센서들 간의 좌표계를 연동하기 위한 정합 방법

김민석, 김예림, 이유철\*  
동국대학교 정보통신공학과

{batandy, yr2819, yulee}@dongguk.edu

## A Registration Method for Integrating Coordinate Systems between Multiple 3D LiDAR Sensors

Min Seok Kim, Ye Rim Kim, Yu-Cheol Lee\*

Department of Information and Communication Engineering, Dongguk University

### 요 약

본 논문은 다수의 3 차원 라이다 센서를 하나의 통합된 좌표계로 정합하기 위한 새롭고 효과적인 기구물과 방법에 관한 것이다. 기구물은 라이다를 통해 효과적인 특징점을 추출할 수 있는 형태로 설계되었다. 그리고 서로 다른 라이다 센서에서 추출된 기구물에 대한 특징점을 매칭하고, 특이값 분해 기법을 통해 라이다 센서 간의 좌표계 변환 정보를 추정하였다. 실험 검증에서는 실제 두 개의 라이다 간의 공통된 좌표계를 추정하고, 이에 맞춰 각각의 라이다에서 획득된 점군을 정합하였을 때 일관된 공간 구조 정보를 구축할 수 있음을 확인하였다.

### I. 서 론

최근에는 고해상도 및 저해상도의 3 차원 라이다 센서 제품군이 다양화되며, 활용 범위가 확대되고 있다. 고해상도 라이다는 공간에 대하여 좀 더 세분화된 점 군 정보를 제공하여 가격이 비싼 반면, 저해상도 라이다는 상대적으로 저가이지만 제한된 점 군 정보를 제공하므로, 여러 대의 라이다 센서를 병합하여 사용하려는 시도가 이루어지고 있다. 이 과정에서 여러 라이다 센서로부터 얻은 점 군 데이터를 하나의 일관된 좌표계로 통합하기 위한 라이다 점 군 정합 기술이 필요하다 [1].

점 군 데이터의 정합을 위한 기술적 접근 방식으로는 스캔 매칭 기법이 많이 활용된다. 대표적인 스캔 매칭 방법으로는 ICP(Iterative Closest Point)와 NDT(Normal Distributions Transform) 알고리즘[2]이 있다. 하지만 기본적인 스캔 매칭 방법들은 초기 위치 추정치에 따라 정확도의 민감성과 계산 복잡도가 높다. 또한 국소 최적해에 빠질 가능성 등 주어진 알고리즘만으로는 해결하기 어려운 문제점을 가지고 있다. 따라서 단순한 스캔 매칭 방법으로 여러 라이다 센서의 점 군 데이터를 정합하기에는 여러 한계가 있다.

본 논문에서는 다수의 3 차원 라이다 센서 사이에서 발생하는 정합 문제를 근본적으로 해결하기 위한 새로운 기구물과 알고리즘 방법론을 제안하였다. 제안한 방법은 기존 라이다 정합 기술의 문제점들을 상당 부분 해결할 수 있는 기술적 진보를 포함하고 있다. 또한 서로 다른 위치에 설치된 두 라이다 점 군 데이터 정합 실험을 수행하여 실제 응용 가능성을 입증하였다

### II. 라이다 정합 기구물 및 방법

본 논문에서는 다수의 3 차원 라이다 센서를 안정적으로 정합하기 위한 시스템을 개발하였다. 이 시스템은 라이다 정합을 위한 기구물과 정합 알고리즘으

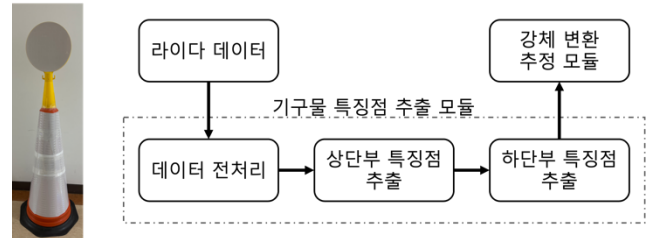


그림 1. 정합 기구물(좌측) 및 정합 시스템(우측)

로 구성되어 있다. 정합 기구물은 그림 1의 좌측같이 하단부에 해당하는 원뿔대 모양의 라바콘과 상단부에 해당하는 원형 표지판, 그리고 표면은 고반사율 재질의 테이프로 코팅하였다. 이러한 구성 요소는 라이다 센서에 의해 정확하게 인식될 수 있도록 설계되었다. 그리고 라이다 정합 알고리즘은 그림 1의 우측과 같은 과정을 통해 운용된다. 제안된 기구물을 사용하여 두 라이다의 위치 간 변환 관계를 계산하여 제공한다. 최종적으로 서로 다른 라이다에서 획득된 점 군 데이터라도 상호간의 획득된 위치 관계에 따라 하나의 좌표계로 변환 가능함을 의미한다.

#### 1. 기구물 특징점 추출

본 과정은 그림 1 우측과 같이 주요한 세단계로 구성된다. 첫번째로 데이터 전처리 단계는 라이다 센서로 스캔 된 점 군 정보 중에서 기구물에 부착된 고반사율 테이프로 인한 높은 반사강도만을 필터링하여 정합 기구물만을 명확히 식별한 후 상단부와 하단부로 군집화하는 것이다. 추가로 상단부의 특징점을 추출하기 전에 라이다의 스캔 라인을 직선화하는 과정이 포함되어 있다. 직선화 과정은 라이다 센서의 수직 채널 별로 검출된 스캔 라인 점 군에 최소제곱법을 적용하여 도출된 직선의 방정식에 구성하는 모든 점 군을 투영하는 작업이다. 이는 기구물 표면의 불규칙성으로 인한 점 군의 오차를 제거하는데 효과적이다.

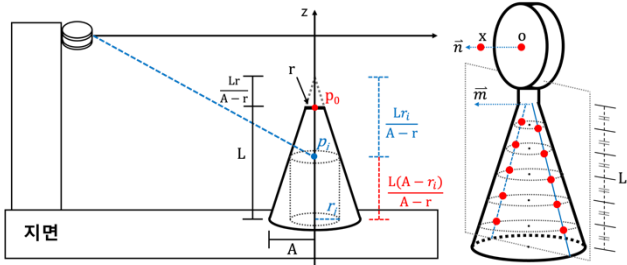


그림 2. 정합 기구물 하단부의 기하학적 정보 계산(좌측) 및 기구물 특징점(우측)

두번째로 상단부 특징점 추출 단계는 기존 직선화된 라인을 이용하여 특징점을 추출하는 과정이다. 직선화된 라인의 양 끝 점을 추출하고 RANSAC(Random Sample Consensus) 알고리즘[3]을 통해 2 차원 원 모델을 생성한다. 이때 그림 2의 우측과 같이 원 모델은 원점(o)과 법선 벡터( $\vec{n}$ )로 이루어진다. 원점에서 법선 벡터 방향으로 일정 거리에 위치한 임의의 한 점(x)을 추가로 계산하여 특징점으로 사용한다.

세번째는 하단부 특징점 추출 단계로 그림 2의 좌측과 같이 기구물 하단부의 꼭짓점  $p_0$ 의 좌표를 추정하는 과정이다. 먼저 하단부 균집 중앙에 위치한 스캔 라인에 최소제곱법을 적용하여 타원 모델을 생성한다. 생성된 원기둥 모델의 중심점, 장축 및 단축의 정보를 이용하여 중심점  $p_i$ 와 반지름  $r_i$ 를 계산한다. 이때 꼭짓점 좌표 추정에 있어서 적용되는 수식은 다음과 같다.

$$p_{0,z} = p_{i,z} - \frac{L(A-r_i)}{A-r} + L \quad (1)$$

여기서  $L$ ,  $A$ ,  $r$ 은 각각 원뿔대의 높이, 하단부 반지름, 상단부 반지름을 의미하며,  $p_{i,z}$ ,  $p_{0,z}$ 는 각각 중심점  $p_i$ , 꼭짓점  $p_0$ 의  $z$ 축 좌표이다. 원뿔대를 바닥면과 평행하게, 그리고 원뿔대의 높이  $L$ 을 기준으로 6 등분 했을 때, 5 개의 원형 단면이 형성된다. 각 단면들은 원뿔대의 높이를 따라 균일한 간격으로 배열된다. 이후, 원형 단면의 중심을 지나며 사전에 계산된 상단부의 법선 벡터( $\vec{n}$ )와 평행한 벡터( $\vec{m}$ )를 포함한 평면을 정의한다. 이 평면과 각 원 형태의 단면들과의 접점을 특징점으로 정의한다. 그림 2 우측에서 기구물 하단의 추출된 특징점을 확인할 수 있다.

서로 다른 라이다에서 획득한 특징점 간의 데이터 연관성을 위해 특징점들은 일정한 순서로 라벨링 되었다. 두 라이다 센서가 동일한 방향을 바라보는 경우, 두 라이다의 특징점 순서를 일치시킨다. 반면에, 서로 반대 방향을 바라보는 경우, 하단부의 특징점들에 대해 좌우 반전하여 순서를 매칭한다.

## 2. 특이값 분해 기반 강제 변환 추정

그림 1의 우측에서 강제 변환 추정 모델은 라이다 센서들 간의 공간적 관계를 정의하기 위해 각 센서에서 추출한 특징점들을 사용하여 회전 행렬  $\mathbf{R}$ 과 병진 벡터  $\mathbf{t}$ 를 아래 수식을 이용하여 추정하는 것이다.

$$\mathbf{UV}^T = \mathbf{H} = \sum_{i=1}^N (\mathbf{y}_i - \bar{\mathbf{y}})(\mathbf{x}_i - \bar{\mathbf{x}})^T, \quad (2)$$

$$\mathbf{R} = \mathbf{UV}^T, \quad \mathbf{t} = \bar{\mathbf{y}} - \mathbf{R}\bar{\mathbf{x}} \quad (3)$$

여기서 각 특징점 균집의 중심점  $(\bar{\mathbf{x}}, \bar{\mathbf{y}}) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\mathbf{x}_i, \mathbf{y}_i)$ 과 공분산 행렬  $\mathbf{H}$ 을 이용하여 특이값 분해에 따른 회전 행렬  $\mathbf{R}$ 과 병진 벡터  $\mathbf{t}$ 를 계산한다.

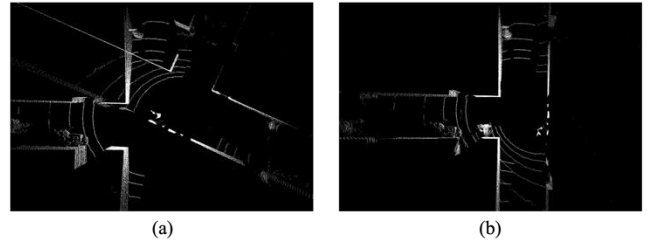


그림 3. 라이다 데이터 (a)정합 전과, (b) 정합 후 비교

## III. 실험 평가

본 연구에서는 제안된 라이다 정합 시스템의 성능 평가를 위해 16 채널 3 차원 라이다 센서 두 대를 약 1m 거리를 두고,  $z$  축 기준으로 약  $120^\circ$  회전하여 설치 후 실험을 진행하였다. 사용된 라바콘의 규격 ( $L$ ,  $A$ ,  $r$ )은 (0.84m, 0.17m, 0.07m)이다.

라이다의 실제 위치를 기반으로 계산된 변환 행렬  $\mathbf{T}_r$ 과 추정된 변환 행렬  $\mathbf{T}_c$ 는 다음과 같다.

$$\mathbf{T}_r = \begin{bmatrix} -0.5 & -0.866 & 0 & 0 \\ 0.866 & -0.5 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}, \quad (4)$$

$$\mathbf{T}_c = \begin{bmatrix} -0.496 & -0.867 & -0.03 & 0 \\ 0.867 & -0.495 & -0.03 & 1.03 \\ -0.01 & -0.04 & 0.999 & 0.05 \end{bmatrix}, \quad (5)$$

여기서 변환 행렬  $\mathbf{T}_r$ 과  $\mathbf{T}_c$ 는 3 차원 회전 행렬  $\mathbf{R}$ 과 3 차원 병진 벡터  $\mathbf{t}$ 로 구성되어  $[\mathbf{R}|\mathbf{t}]$ 와 같은 형태를 지닌다. 추정된 변환 행렬  $\mathbf{T}_c$ 는 변환 행렬  $\mathbf{T}_r$ 과 비교 분석한 결과,  $x$ ,  $y$  축에서 약간의 오차가 발생하였으며, 라이다 간 거리의 경우 0.031m의 오차가 발생하였다. 최종적으로 제안된 시스템을 정합한 결과는 그림 3과 같다. 그림 3의 (a)는 정합 전 데이터의 차이를 보여주며, (b)는 제안된 방법으로 정합한 후의 결과를 나타낸다.

## IV. 결론 및 차후 계획

본 연구에서는 3 차원 라이다 센서들을 효과적으로 정합할 수 있는 기구물과 알고리즘을 제안하였다. 제안된 시스템을 통해 센서간 정밀한 공간 관계 추정이 가능했다는 점에서 기존 방법들과 차별성 있는 장점을 확인하였다. 향후 더 정확한 정합 성능 향상을 위해 다양한 실험 환경에서의 검증과 알고리즘 최적화가 필요하다. 또한 다른 유형의 센서 데이터 통합에도 시스템을 활용할 방안을 모색할 예정이다.

## ACKNOWLEDGMENT

본 연구는 산업통상자원부 재원으로 한국산업기술기획평가원 (KEIT)의 지원을 받아 수행한 연구 과제임 (No. 20024008, AI 및 로봇을 활용한 조선/항공/건설 도장 공정 자동화 플랫폼 기술 개발)

## 참고 문헌

- [1] J. Beltrán, et al, "Automatic Extrinsic Calibration Method for LiDAR and Camera Sensor Setups," IEEE Trans. Intell. Transp. Syst., vol. 23, no. 10, pp. 17677-17689, 2022.
- [2] B. Wang, et al., "A Review of Point Cloud Registration Methods Based on Laser SLAM," in Proc. of IEEE EEBDA, 2023, pp. 1639-1642.
- [3] M. A. Fischler and R. C. Bolles, "Random Sample Consensus: A Paradigm for Model Fitting with Applications to Image Analysis and Automated Cartography," Commun. ACM, vol. 24, no. 6, pp. 381-395, 1981.