

표적의 연속 궤적을 이용한 FMCW 레이더-라이다 시간 및 공간 캘리브레이션 기법

오세찬, 박정훈, 김성철

서울대학교 전기정보공학부 뉴미디어통신공동연구소

{my7868, hoon0337, sckim}@maxwell.snu.ac.kr

Extrinsic and Temporal Calibration of FMCW Radar and LiDAR Using Target Trajectories

Sechan Oh, Jeong-Hoon Park, Seong-Cheol Kim

Department of Electrical and Computer Engineering and INMC, Seoul National University

요약

본 논문은 3D 라이다와 FMCW(Frequency Modulated Continuous Wave) 레이더 간 시간 및 공간 캘리브레이션을 위한 새로운 기법을 제안한다. 제안된 기법은 코너 리플렉터를 고정 표적으로 두고 센서 플랫폼을 이동하며 표적을 지속적으로 추적한 후, 각 센서 좌표계에서 얻은 연속 궤적을 이용하여 ICP(Iterative Closest Point)로 초기 정렬 후 Kabsch 알고리즘과 GD(Gradient Descent)로 정밀 보정하여 시간 및 공간 캘리브레이션 파라미터를 도출한다. 실험 결과 RMSE(Root Mean Squared Error) 기준 0.0577 m의 궤적 정렬 정확도를 달성하였다. 또한 간단한 표적과 절차만으로 수행 가능하며, 기존 표적 기반 방법의 낮은 편의성을 개선하였다.

I. 서론

자율주행 기술의 발전과 함께 다양한 조건에서의 정확한 환경 해석이 요구되며, 센서 융합은 이를 가능하게 한다. 자율주행 시스템은 상호 보완적인 정보를 제공하는 여러 센서를 사용하며, 대표적으로 라이다와 레이더가 있다. 라이다는 고해상도의 3차원 환경 정보를 제공하지만 비-안개-눈 등 악천후에서는 성능이 저하된다. 반면 레이더는 탐지 포인트가 희소하지만, 낮은 비용과 장거리 탐지, 악천후 강건성 측면에서 유리하다. 이러한 상호 보완적 특성 때문에 레이더와 라이다 간 융합 센싱이 필요하다.

각 센서는 고유 좌표계에서 환경을 독립적으로 관측하므로, 이를 정렬하기 위해 좌표계 변환 파라미터를 추정하는 공간 캘리브레이션이 필요하다. 공간 캘리브레이션은 표적 기반과 비표적 방법으로 나뉜다. 표적 기반 방법은 탐지가 용이하도록 설계된 표적을 사용해 높은 공간 캘리브레이션 정확도를 확보할 수 있으며, 표적의 시간에 따른 궤적을 이용하면 센서 간 시간 오프셋을 추정할 수 있다. 그러나 다수 표적 사용, 반복 스캔, 특수 표적 제작 등으로 편의성과 비용 측면에서 불리하다 [1,2]. 반면, 비표적 방법은 별도의 표적 없이 환경에 존재하는 물체를 탐지하기 때문에 편의성과 비용 측면에서 유리하지만 정확도가 낮다.

본 논문은 3D 라이다와 FMCW(Frequency Modulated Continuous Wave) 레이더 간 시간 및 공간 캘리브레이션을 위한 새로운 기법을 제안한다. 표적의 연속 궤적을 이용해 시간 정렬을 수행하고, ICP(Iterative Closest Point)로 초기 정렬 후 Kabsch 알고리즘과 GD(Gradient Descent)로 정밀 보정한다. 제안 기법은 간단한 표적과 절차만으로 수행 가능하며, 기존 표적 기반 방법의 낮은 편의성을 개선하였다.

II. 본론

1. 각 센서별 표적의 연속 궤적 생성

본 논문에서는 레이더가 2차원 공간에서, 라이다가 3차원 공간에서 각각 표적을 탐지하는 상황을 가정한다. 연속 궤적을 생성하기 위해 표적을 고

정한 상태에서, 시야각 내에 표적이 위치하도록 센서 플랫폼을 이동시키며 레이더와 라이다 데이터를 취득한다. 표적을 옮기지 않고 센서 플랫폼만 이동한 이유는 표적 주변에 클러스터를 만들지 않기 위함이다. 이렇게 취득한 데이터를 기반으로 각 센서에서 표적의 연속 궤적을 계산할 수 있다. 레이더는 거리-도플러 맵의 최대 피크를 탐지한 뒤 MUSIC(Multiple Signal Classification) 알고리즘으로 각도를 추정하였으며, 라이다는 표적 포인트를 수동으로 라벨링한 후 레이더의 관측 평면으로 투영하여 궤적을 생성하였다.

2. 시간 및 공간 캘리브레이션

레이더와 라이다에서 획득한 표적의 연속 궤적은 동일 표적에 대한 관측이므로, 두 궤적 사이의 평행이동과 회전변환은 레이더-라이다 좌표계 사이의 공간 캘리브레이션을 수행하는 것과 동일하다. 따라서 라이다의 궤적 $\{(\mathbf{p}_i^L, t_i^L)\}_{i=1}^N$ 와 레이더의 궤적 $\{(\mathbf{p}_j^R, t_j^R)\}_{j=1}^M$ 이 주어졌을 때, 공간 캘리브레이션 파라미터 (θ, \mathbf{d}) 는 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$\arg \min_{\theta, \mathbf{d}} \sum_{(i,j) \in X} \|\mathbf{p}_i^L - R(\theta)\mathbf{p}_j^R - \mathbf{d}\|^2, X = \{(i,j) | t_i^L = t_j^R\}$$

이때, i 와 j 는 프레임 번호, N 은 라이다 프레임 개수, M 은 레이더 프레임 개수, \mathbf{p}_i^L 은 레이더 관측 평면에 해당하는 표적에 대한 라이다 포인트, \mathbf{p}_j^R 은 표적에 대한 레이더 포인트, t_i^L 은 라이다 포인트의 time stamp, t_j^R 은 레이더 포인트의 time stamp, $\mathbf{d} = [d_x, d_y]^T$ 는 평행이동 벡터,

$R(\theta) = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta \\ \sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix}$ 은 회전변환, θ 는 z 축 회전 각도이다. 그런데 X 는 공집합이거나, 크기가 매우 작을 가능성이 크다. 따라서 본 논문에서는 ICP를 이용하여 공간상에서 두 센서에서 취득한 궤적간의 초기 정렬을 수행하고, Kabsch 알고리즘과 GD로 정밀 보정하는 방법을 사용한다.

ICP는 두 포인트 집합을 정렬하는 알고리즘으로, 이를 이용하면 두 궤적을 정렬하는 (θ_0, \mathbf{d}_0) 를 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$(\theta_0, \mathbf{d}_0) = \text{ICP}\left(\{\mathbf{p}_i^L\}_{i=1}^N, \{\mathbf{p}_j^R\}_{j=1}^M\right)$$

이때, (θ_0, \mathbf{d}_0) 를 이용하여 라이다 제적과 공간적으로 가장 잘 정렬된 제적 $\{(\tilde{\mathbf{p}}_i, \tilde{t}_i)\}_{i=1}^N$ 를 다음과 같이 정의하면 레이더와 라이다 사이의 시간 오프셋의 초기 추정값 τ_0 를 구할 수 있다.

$$\tilde{\mathbf{p}}_i = \alpha_i \mathbf{p}_j^R + (1 - \alpha_i) \mathbf{p}_{j+1}^R, \quad \tilde{t}_i = \alpha_i t_j^R + (1 - \alpha_i) t_{j+1}^R$$

이때, (α_i, j) 는 ICP로 얻은 θ_0, \mathbf{d}_0 에 의해 다음과 같이 얻는다.

$$\arg \min_{\alpha_i \in [0,1], j} \|\mathbf{p}_i^L - R(\theta_0)(\alpha_i \mathbf{p}_j^R + (1 - \alpha_i) \mathbf{p}_{j+1}^R) - \mathbf{d}_0\|^2$$

따라서, τ_0 는 \tilde{t}_i 와 t_i^L 의 차이의 평균을 이용하여 다음과 같이 얻는다.

$$\tau_0 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\tilde{t}_i - t_i^L)$$

τ_0 를 초기값으로 하고 GD를 이용하여 레이더와 라이다 사이의 시간 오프셋 τ 를 정밀 추정하는 과정은 다음과 같다.

$$\tau_{k+1} = \tau_k + \eta \nabla f(\tau_k), \quad \nabla f(\tau) \approx \frac{f(\tau+h) - f(\tau-h)}{2h},$$

$$f(\tau) = \frac{1}{N} \sqrt{\sum_{i=1}^N \|\mathbf{p}_i^L - R(\theta_\tau) \mathbf{p}_i^{\text{pair}}(t_i^L + \tau) - \mathbf{d}_\tau\|^2}$$

이때, η 는 학습률, h 는 수치미분의 보간 간격, $\mathbf{p}_i^{\text{pair}}(t_i^L + \tau)$ 는 라이다 제적과 시간적으로 정렬된 매칭쌍으로 다음과 같다.

$$\mathbf{p}_i^{\text{pair}}(t_i^L + \tau) = \beta_i \mathbf{p}_j^R + (1 - \beta_i) \mathbf{p}_{j+1}^R, \quad 0 \leq \beta_i = \frac{t_i^L + \tau - t_j^R}{t_{j+1}^R - t_j^R} < 1$$

또한, $(\theta_\tau, \mathbf{d}_\tau)$ 는 Kabsch 알고리즘을 통해 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\overline{\mathbf{p}_i^{\text{pair}}(t_i^L + \tau)} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \mathbf{p}_i^{\text{pair}}(t_i^L + \tau), \quad \overline{\mathbf{p}_i^L} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \mathbf{p}_i^L,$$

$$A = \left[\overline{\mathbf{p}_i^{\text{pair}}(t_i^L + \tau)} - \overline{\mathbf{p}_i^{\text{pair}}(t_i^L + \tau)} \right]_{i=1}^N, \quad B = \left[\overline{\mathbf{p}_i^L} - \overline{\mathbf{p}_i^L} \right]_{i=1}^N,$$

$$A^T B = U \Sigma V^T, \quad R(\theta_\tau) = V U^T, \quad \mathbf{d}_\tau = \overline{\mathbf{p}_i^L} - R(\theta_\tau) \overline{\mathbf{p}_i^{\text{pair}}(t_i^L + \tau)}$$

이때, U 는 왼쪽 특이벡터 행렬, Σ 는 특이값 대각행렬, V 는 오른쪽 특이벡터 행렬이다.

3. 실험

코너 리플렉터는 일반적인 물체에 비해 높은 RCS(Radar Cross Section) 덕분에 반사신호가 강하고 레이더에서 탐지가 용이하며, 충분한 반사면을 갖기 때문에 라이다에서도 탐지가 용이하다. 본 실험에서는 그림 1의 코너 리플렉터를 표적으로 사용하였고, TI 77 GHz FMCW AWR2243과 Velodyne VLP-16를 탑재한 센서 플랫폼을 그림 2와 같이 구성하였다. 라이다는 16채널 구조로, 프레임 간격은 100 ms를 사용하였고, 레이더의 파라미터는 표 1에 정리하였다.

실험 결과, 그림 3과 같이 GD를 통해 최적값에 수렴하였으며, 이때의 최적 해는 $\tau = -6.73$ s, $\theta = 3.39^\circ$, $t_x = 0.021$ m, $t_y = 0.003$ m이고, 제적 정렬 오차 RMSE(Root Mean Squared Error)가 0.0577 m로 우수한 성능을 보였다. 또한 그림 5에서 레이더와 라이다 제적이 올바르게 정렬됨을 확인하였다. 이를 통해 단일 표적만으로도 레이더-라이다의 시간 및 공간 캘리브레이션이 가능함을 확인하였다.

III. 결론

본 논문에서는 3D 라이다와 FMCW 레이더 사이의 캘리브레이션을 위한 새로운 기법을 제안하였다. 제안 기법은 표적의 연속 제적을 이용해 시간 정렬을 수행하고, ICP로 초기 정렬 후 Kabsch 알고리즘과 GD로 정밀



그림 1 코너 리플렉터



그림 2 센서 플랫폼

파라미터	값	파라미터	값
중심 주파수	77.52 GHz	송수신 안테나 수	3 × 4
대역폭	870 MHz	프레임당 처프 수	64
처프 신호 간격	195 μs	처프당 샘플 수	512
프레임 간격	50 ms	측정 프레임 수	300

표 1 레이더 파라미터

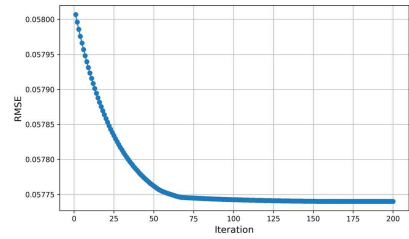


그림 3 GD 기반 시간 오프셋 최적화

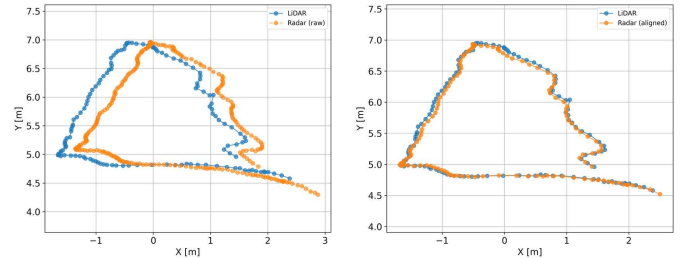


그림 4 레이더와 라이다에서 생
성된 표적의 연속 제적

그림 5 제안 기법을 통해 정렬
된 제적

보정한다. 실험 결과, 두 제적 간 정렬 오차는 0.0577 m로 높은 정확도를 보였다. 또한 간단한 표적과 절차만으로 수행 가능하며, 기존 표적 기반 방법의 낮은 편의성을 개선하였다.

ACKNOWLEDGMENT

이 연구는 2025년도 산업통상자원부 및 산업기술평가관리원(KEIT) 연구비 지원에 의한 연구임(20014098).

참 고 문 헌

- [1] Y. Yang and M. Ren, "Extrinsic Calibration Method for LiDAR and Millimeter-Wave Radar Systems," in 2024 International Conference on Advanced Control Systems and Automation Technologies (ACSAT), Jan. 2024, pp. 53 - 59.
- [2] J. Xu, K. Bansal, and D. Bharadia, "CalTag: Robust calibration of mmWave Radar and LiDAR using backscatter tags," Sept. 17, 2024, arXiv: arXiv:2408.16867.