

Voxel Map

■ 담당자/요청	Ⓢ 조영진
■ 팀	연구개발팀
■ 프로젝트 단계	
■ 파트(HW)	

Voxel Map 이란?

- Voxel-Map은 LiDAR Odometry를 위해 제안된 효율적이고 확률적인 adaptive한 voxel mapping 방법
- 단순히 점의 집합이 아니라, 각 복셀(Voxel, 3차원 공간을 나눈 작은 정육면체 단위)이 하나의 평면(plane) 특징을 포함하는 맵이다.
- 이 방법은 환경을 확률적으로 표현하여 새로운 LiDAR 스캔을 정확하게 등록하는 것을 목표로 함

Voxel Map의 핵심 특징

- 확률적 평면 표현 (Probabilistic Plane Representation)
 - Voxel Map의 가장 큰 특징은 맵의 불확실성을 정확하게 모델링한다는 점
 - 기존의 PointCloud map은 map 자체의 노이즈를 고려하기 어려웠음
 - 즉, 맵을 구성하는 점들이 완벽하게 정확한 위치가 아니라 실제로는 미세한 측정 오차(노이즈)를 포함하고 있다는 사실을 시스템이 제대로 반영하지 못한다는 뜻
 - Voxel Map은 이 문제를 해결하기 위해 각 평면의 불확실성을 두 가지 주요 원인으로부터 계산
 - LiDAR 측정 노이즈 : LiDAR 센서 자체의 거리 및 방향 측정에서 발생하는 고유한 오차
 - 센서 자세 추정 오차 : 로봇의 자세(pose) 추정에 포함된 오차로, 이로 인해 LiDAR 포인트를 월드 좌표계로 변환할 때 불확실성이 추가됨
 - 이 두가지 불확실성을 모두 고려하여 각 평면의 법선 벡터와 중심점에 대한 공분산을 계산.
 - 이를 통해 더 정확하고 신뢰성 높은 point-plane 매칭이 가능해짐

- 적응형 및 Coarse-to-Fine 구조(Adaptive and Coarse-to-Fine)
 - LiDAR 데이터는 스캔 초기에는 sparse하다가 시간이 지나며 dense 해지는 Coarse-to-Fine(거친 수준에서 점차 상세한 수준으로) 현상을 보임.
 - Voxel Map은 이러한 특성에 효과적으로 대응
 - 적응형 크기(Adaptive Size) : 환경 구조에 맞춰 복셀의 크기를 다르게 설정. 예를 들어, 평평한 지면이나 벽과 같은 넓은 구조물을 큰 복셀로 표현하고, 나무나 자동차 같은 복잡한 객체는 작은 복셀로 나누어 세밀하게 표현
 - Coarse-to-Fine 구축 : 맵 생성을 거친 해상도(큰 복셀)에서 시작. 만약 한 복셀 안의 포인트들이 단일 평면으로 보기 어렵다면, 그 복셀을 8개의 작은 하위 복셀(Octree 구조)로 재귀적으로 분할. 이 과정을 통해 처음에는 희소한 포인트로도 대략적인 맵을 만들고, 포인트가 더 수집되면 맵을 점차 정교화 할 수 있다.
- 효율적인 데이터 구조(Octree-Hash)
 - 빠른 맵 구축, 업데이트, 조회를 위해 해시 테이블과 옥트리를 결합한 데이터 구조를 사용
 - 해시 테이블 : 전체 공간을 거친 해상도의 복셀로 나누고, 포인트가 포함된 복셀만 해시 테이블에 인덱싱하여 관리. 이를 통해 특정 위치의 복셀을 $O(1)$ 에 가까운 매우 빠른 속도로 찾을 수 있음
 - 옥트리 : 해시 테이블의 각 항목(거친 복셀) 내부는 옥트리를 사용하여 위에서 설명한 Coarse-to-Fine 방식의 적응형 분할을 관리.
 - 이 구조 덕분에 kd-tree를 실시간으로 구축하는 다른 방법에 비해 연산 효율성이 매우 높음

Voxel Map의 작동 방식

- 맵 구축 (Construction) : 첫 LiDAR 스캔 데이터가 들어오면, 포인트를 거친 해상도의 복셀에 분배하고, 해시 테이블로 인덱싱 함. 각 복셀 내에서 평면 피팅을 시도하고, 실패하면 옥트리 구조에 따라 더 작은 복셀로 분할하는 과정을 반복. 성공적으로 피팅된 평면은 파라미터(법선, 중심)와 불확실성(공분산) 정보와 함께 저장됨.
- 맵 업데이트 (Update) : 새로운 LiDAR 스캔이 들어오면, 추정된 로봇의 자세를 이용해 포인트를 맵에 등록. 포인트가 기존 복셀에 추가되면, 해당 복셀의 평면 파라미터와 불확실성을 업데이트. 불확실성이 일정 수준 이하로 수렴하면(ex. 50개 이상의 포인트가 쌓이면), 계산 효율을 위해 과거 포인트 데이터를 버리고 추정된 평면 정보만 유지.
- Point-to-Plane Match : 새로운 스캔의 각 포인트를 맵에 등록하기 위해, 해시 테이블을 이용해 해당 위치의 복셀을 빠르게 찾음. 그 후, 확률 모델을 기반으로 포인트와 가장

가능성 높은 평면을 매칭. 이때 계산된 point-to-plane 간의 거리가 통계적 유의성(ex. 3-sigma)을 만족하는 경우에만 유효한 매칭으로 간주하여, 잘못된 연관(false match)을 효과적으로 제거.