



3D激光SLAM介绍

主讲人 曾书格

越凡创新技术负责人
电子科技大学硕士





3D激光SLAM



1. 3D激光SLAM



2. LOAM



3D激光SLAM



1. 3D激光SLAM



2. LOAM

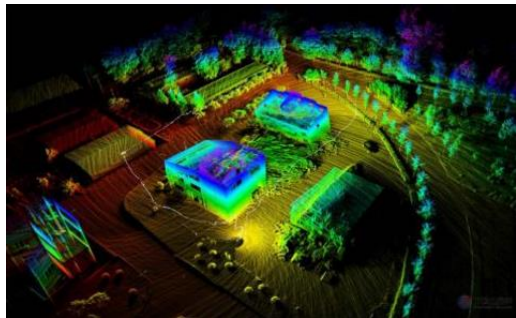


3D激光SLAM



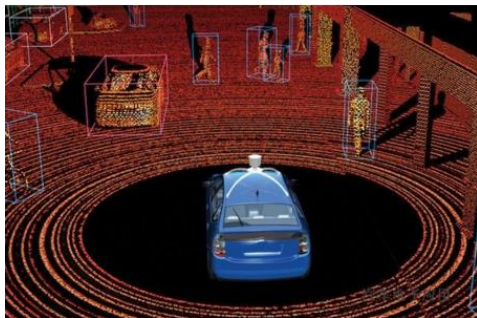
介绍

- 地图形式



3D激光地图

- 主要应用领域



无人驾驶汽车



外卖小车

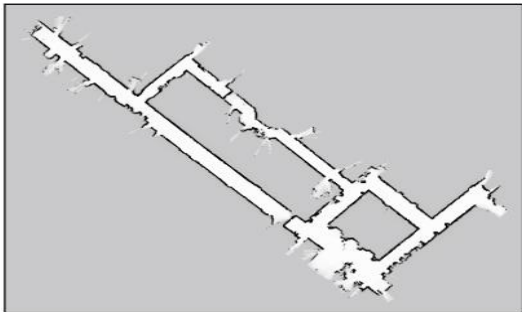


3D激光SLAM—对比



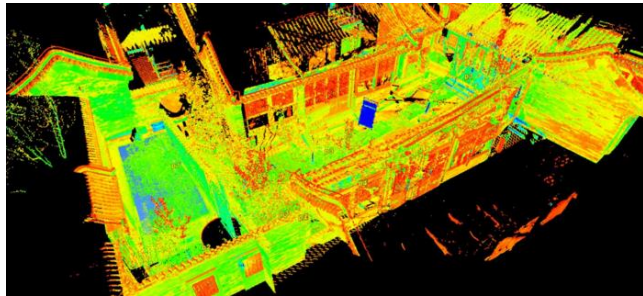
2D激光SLAM

- 单线激光雷达
- 二维栅格地图
- 室内移动机器人



3D激光SLAM

- 多线激光雷达
- 三维点云地图或者三维栅格地图
- 室外移动机器人





3D激光SLAM—帧间匹配

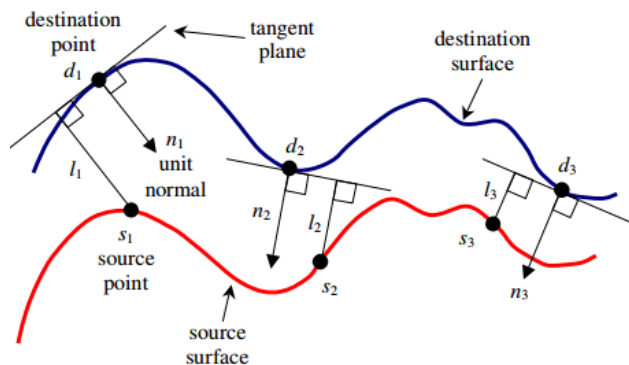


帧间匹配算法—Point-to-Plane ICP(点面ICP)

- 目标函数：

$$\mathbf{M}_{\text{opt}} = \arg \min_{\mathbf{M}} \sum_i ((\mathbf{M} \cdot \mathbf{s}_i - \mathbf{d}_i) \cdot \mathbf{n}_i)^2$$

- 示意图：





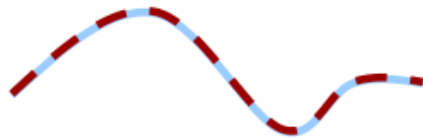
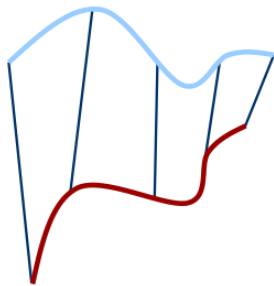
3D激光SLAM—帧间匹配



帧间匹配算法—Feature-based Method

- 提取特征点：VPF、FHPF、角点、平面点等
- 基于已知对应点的ICP方法：

$$R = VU^T$$
$$t = u_x - Ru_p$$





3D激光SLAM—帧间匹配



帧间匹配算法—Normal Distribution Transform(NDT方法)

- 把空间划分成小方格
- 点云数据在小方格中服从高斯分布，并根据点云数据计算出该小方格中对应的高斯分布参数：

$$u = \frac{1}{n} \sum x_i \quad \Sigma = \frac{1}{n} \sum (x_i - u)(x_i - u)^T$$

- 落在该方格内的点 x ，其得分为：

$$s \approx e^{-\frac{1}{2}(x-u)^T \Sigma^{-1} (x-u)}$$

- 目标函数为：

$$Score = \sum e^{-\frac{1}{2}(x_i-u)^T \Sigma^{-1} (x_i-u)}$$



3D激光SLAM



1. 3D激光SLAM



2. LOAM

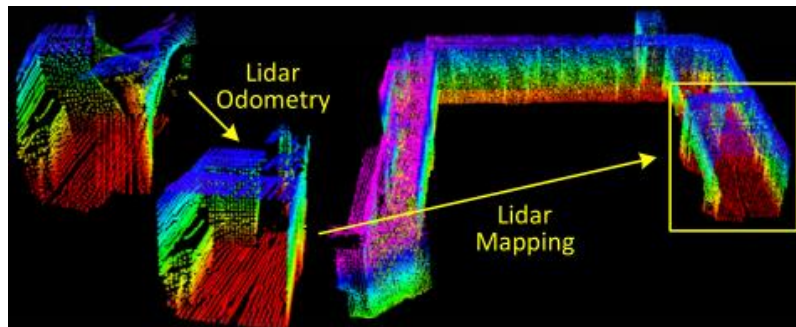


3D激光SLAM—Lidar Odometry And Mapping(LOAM)



介绍

- 3D激光“SLAM”算法
- 为数不多的开源3D激光SLAM算法之一
- KITTI数据集Odometry排行榜上长期霸占第一
- Feature-based 匹配方法



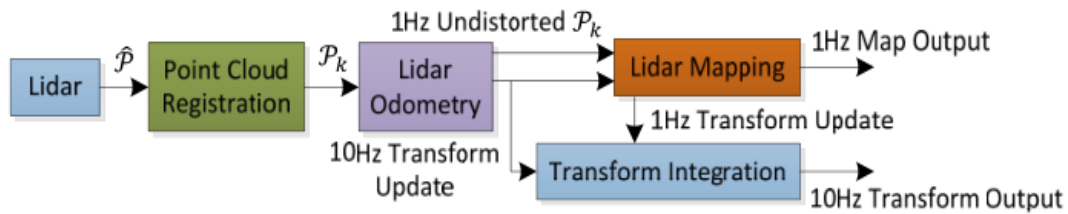


3D激光SLAM—Lidar Odometry And Mapping(LOAM)



框架

- 激光的帧率为1Hz
- 匀速运动假设
- 激光里程计模型
- 激光建图模块
- 每一帧数据由多个scan组成，称为sweep





3D激光SLAM—Lidar Odometry And Mapping(LOAM)



激光里程计模块—特征点提取模块

- 计算曲率:

$$c = \frac{1}{|S| \cdot \|X_{(k,i)}^L\|} \left\| \sum_{j \in S, j \neq i} (X_{(k,i)}^L - X_{(k,j)}^L) \right\|.$$

L 表示激光坐标系

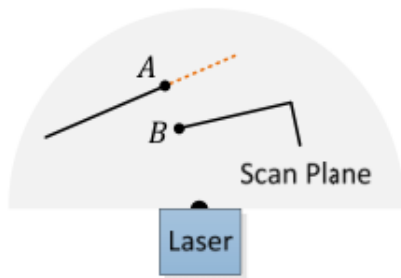
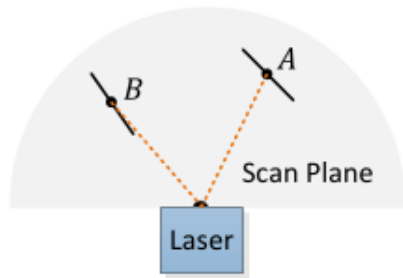
$X_{(k,i)}$ 表示第 k 帧数据的第 i 个点

S 表示与点 i 相邻的连续点集

- 曲率项最大为Edge Point, 最小为Planar Point.

- 每一个水平激光帧, 分为四个区域; 每个区域最多有2个edge point和4个planar point.

- 去除不稳定特征点:





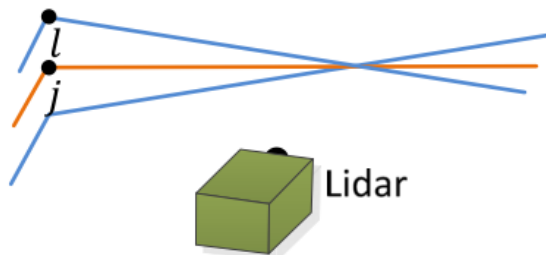
3D激光SLAM—Lidar Odometry And Mapping(LOAM)



激光里程计模块—特征点匹配

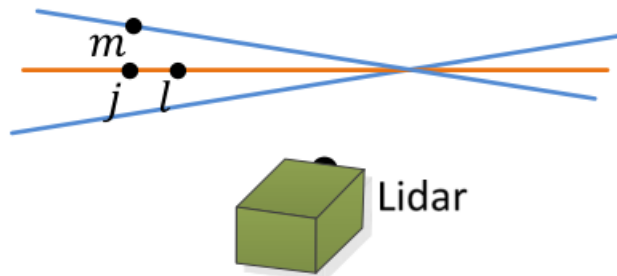
- Edge Point匹配

- (1) 在参考帧中，找到离当前edge point最近的edge point j ;
- (2) edge point j 的相邻scan中，找到另一个edge point l , (j, l) 组成匹配直线。



- Planar Point匹配

- (1) 在参考帧中，找到离当前planar point最近的planar point j ;
- (2) 找到另外两个最近的planar point l, m ; 要求一个与 j 共scan, 另一个在相邻的scan中, (j, l, m) 组成一个匹配平面。





3D激光SLAM—Lidar Odometry And Mapping(LOAM)



激光里程计模块—特征点匹配

- Edge Point的目标函数:

$$d_{\mathcal{E}} = \frac{\left| (\tilde{\mathbf{X}}_{(k+1,i)}^L - \bar{\mathbf{X}}_{(k,j)}^L) \times (\tilde{\mathbf{X}}_{(k+1,i)}^L - \bar{\mathbf{X}}_{(k,l)}^L) \right|}{\left| \bar{\mathbf{X}}_{(k,j)}^L - \bar{\mathbf{X}}_{(k,l)}^L \right|}$$

点到直线的距离

- Planar Point的目标函数:

$$d_{\mathcal{H}} = \frac{\left| (\tilde{\mathbf{X}}_{(k+1,i)}^L - \bar{\mathbf{X}}_{(k,j)}^L) \cdot ((\bar{\mathbf{X}}_{(k,j)}^L - \bar{\mathbf{X}}_{(k,l)}^L) \times (\bar{\mathbf{X}}_{(k,j)}^L - \bar{\mathbf{X}}_{(k,m)}^L)) \right|}{\left| (\bar{\mathbf{X}}_{(k,j)}^L - \bar{\mathbf{X}}_{(k,l)}^L) \times (\bar{\mathbf{X}}_{(k,j)}^L - \bar{\mathbf{X}}_{(k,m)}^L) \right|}$$

点到平面的距离



3D激光SLAM—Lidar Odometry And Mapping(LOAM)

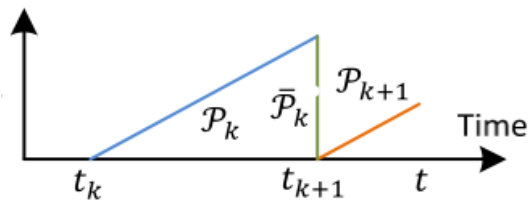


激光里程计模块—运动估计

- 在整个sweep期间，机器人在匀速运动；令 $T_k^L(t)$ 表示 t 时刻相对于 t_k 时刻的机器人位姿，则对于当前帧的第 i 个激光点，设其对应的时间为 $t_{(k,i)}$ ，则其对应的位姿为：

$$T_{(k,i)}^L = \frac{t_{(k,i)} - t_k}{t - t_k} T_k^L(t)$$

- 接收完整的sweep会投影到同一时刻：



P_k 表示不完全的sweep；

\bar{P}_k 表示完整的 sweep，可以作为下一帧匹配的参考帧。



3D激光SLAM—Lidar Odometry And Mapping(LOAM)



激光里程计模块—运动估计

- 构造目标函数：

$$f_{\mathcal{E}}(\mathbf{X}_{(k,i)}^L, \mathbf{T}_k^L(t)) = d_{\mathcal{E}}, \quad i \in \mathcal{E}_k.$$

$$f_{\mathcal{H}}(\mathbf{X}_{(k,i)}^L, \mathbf{T}_k^L(t)) = d_{\mathcal{H}}, \quad i \in \mathcal{H}_k.$$

$$f(\mathbf{T}_k^L(t)) = d$$

- 非线性优化求解：

$$\mathbf{J} = \partial f / \partial \mathbf{T}_k^L(t)$$

$$\mathbf{T}_k^L(t) \leftarrow \mathbf{T}_k^L(t) - (\mathbf{J}^T \mathbf{J} + \lambda \text{diag}(\mathbf{J}^T \mathbf{J}))^{-1} \mathbf{J}^T d$$



3D激光SLAM—Lidar Odometry And Mapping(LOAM)



激光里程计模块—总结

Algorithm 1: Lidar Odometry

```
1 input :  $\bar{\mathcal{P}}_{k-1}, \mathcal{P}_k, \mathbf{T}_k^L(t)$  from the last recursion at initial guess
2 output :  $\bar{\mathcal{P}}_k$ , newly computed  $\mathbf{T}_k^L(t)$ 
3 begin
4   if at the beginning of a sweep then
5      $\mathbf{T}_k^L(t) \leftarrow \mathbf{0}$ ;
6   end
7   Detect edge points and planar points in  $\mathcal{P}_k$ , put the points in
    $\mathcal{E}_k$  and  $\mathcal{H}_k$ , respectively;
8   for a number of iterations do
9     for each edge point in  $\mathcal{E}_k$  do
10      Find an edge line as the correspondence, then
      compute point to line distance based on (7) and stack
      the equation to (9);
11    end
12    for each planar point in  $\mathcal{H}_k$  do
13      Find a planar patch as the correspondence, then
      compute point to plane distance based on (8) and
      stack the equation to (9);
14    end
15    Compute a bisquare weight for each row of (9);
16    Update  $\mathbf{T}_k^L(t)$  for a nonlinear iteration based on (10);
17    if the nonlinear optimization converges then
18      Break;
19    end
20  end
21  if at the end of a sweep then
22    Project each point in  $\mathcal{P}_k$  to  $t_{k+1}$  and form  $\bar{\mathcal{P}}_k$ ;
23    Return  $\mathbf{T}_k^L(t)$  and  $\bar{\mathcal{P}}_k$ ;
24  end
25  else
26    Return  $\mathbf{T}_k^L(t)$ ;
27  end
28 end
```

- 特征点检测
- 寻找匹配点
- 构建非线性方程组
- 求解非线性方程组
- 如果到了当前帧的末尾，则投影到当前时刻，开始进行下一帧的求解

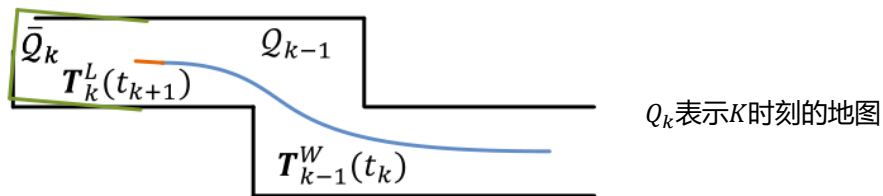


3D激光SLAM—Lidar Odometry And Mapping(LOAM)



激光建图模块

- Lidar Odometry的输出跟地图进行匹配：



- Mapping过程提取的特征点数量，是Lidar Odometry的10倍。
- 特征点的匹配不是寻找对应的2个或者3个特征点，而是对于当前帧的特征点，在 Q_{k-1} 中的对应位置附近10cm*10cm*10cm的cubic中提取所有的特征点。



3D激光SLAM—Lidar Odometry And Mapping(LOAM)



激光建图模块—直线匹配

- 对于edge point, cubic中的所有edge point会按照直线进行分布。根据这些特征点求解出直线的方程。
- 根据Cubic中的edge point, 计算位姿协方差矩阵。
- 对协方差矩阵进行特征值分解。
- 最大特征值对应的特征向量即为直线的方向向量。
- 该直线通过所有edge point的几何中心。



3D激光SLAM—Lidar Odometry And Mapping(LOAM)



激光建图模块—平面匹配

- 对于planar point, cubic中的所有planar point会按照平面进行分布。根据这些特征点求解出平面的方程。
- 根据Cubic中的planar point, 计算位姿协方差矩阵。
- 对协方差矩阵进行特征值分解。
- 最小特征值对应的特征向量, 即为平面的法向量。
- 该平面通过所有planar point的几何中心。

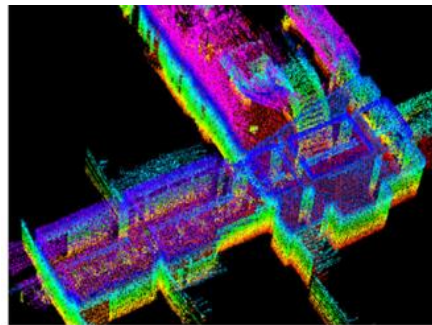
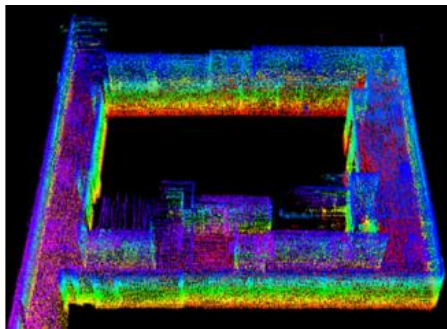


3D激光SLAM—Lidar Odometry And Mapping(LOAM)



激光建图模块

- 按照Lidar Odometry模块的估计方式进行运动估计即可，最终的结果如下：





[1] LOAM: Lidar Odometry and Mapping in Real-time

[2] V-LOAM: Visual-lidar Odometry and Mapping

[3] IMLS-SLAM: scan-to-model matching based on 3D data



代码讲解

ALOAM代码讲解

3D 激光SLAM算法介绍



结语

感谢聆听！

Thanks for Listening