```
一个系统,包含多激光雷达的外参标定、里程计与建图
                   提取边缘特征与线特征
                   基于滑窗的里程计与在线标定
                   基于不确定性的地图构建
                         激光雷达的稀疏的垂直方向分辨率会导致在走廊与楼梯中发生退化
          I Introduction
                                  标定问题
                                  环境点的不确定性
                       数学符号
                       MLE问题的构建
                                     测量的点的不确定性与其x,y,z值有关
                       不确定性表示
                                                        场景退化
                                     位姿的不确定性来源于
          II 问题陈述
                                                       外参标定误差
                                                                       传感器噪声
                                             三种情况导致landmark的不确定性
                                                                       位姿退化
                                                                       外参扰动
                       近似高斯噪声下的MLE问题
                                             在里程计环节不进行三维点的不确定性传播
                                             在建图环节进行三维点的不确定性传播
                                        激光雷达时间同步
                        遵循三个简化假设
                                        在标定初始化阶段,平台有足够的旋转与位移
                                        主激光雷达构建的local map与辅激光雷达有足够的重叠面基
          III 系统总览
                                首先提取每隔激光雷达的特征点
                                初始化 包括位姿与外参biaoding
                                初始化成功后, 进入滑窗优化模块。
                                最后是概率建图(probalilistic mapping module,VIII)模块。
                      聚类分割
                                  利用dfs方法对由点云生成的深度图进行聚类,并去除尺寸过小的segment
                                      和LOAM相同,提取Edge特征与PLANAR特征。
                       特征提取与匹配
                                      对于edge_point, 提取两个最近邻点与其关联。对于Planar点, 提取三个点与其关联
                                                                      对于Planar点,求的是其到最近平面的法向量乘距离
论文
                                           类似 于LOAM的残差,并进行了改进
                                                                      对于Edge点,求的是该点与最近的线组成的平面s的距离,
                                                                      以及该点到垂直于该平面s的垂直平面的距离
                      A.基于点云帧的运动估计
                                           有利于计算3x3协方差矩阵?
                                           点云的畸变矫正
                                                         将所有点变换到最后一个点的时间戳上。
          VI. 初始化
                                         手眼标定
                                                                                                         因为如果约束足够多,那么求出来的旋转(四元数表示)也唯一。而对于
                      B.多激光雷达的标定
                                                                                                         Ax=0这个方程而言, x只要方向不变, 改变模长, 这个式子仍然成立。则
                                                                          如果约束足够多,那么A的零空间的秩为1?
                                                                                                         零空间的秩为1
                                        分为两步求解。首先求解旋转问题,构建AX=0求解
                                        之后根据求解得到的旋转构建最小二乘求位移
                                                                                     fixed pose,在优化中不会被更新
                                        A. 问题构建
                                                    构建滑窗问题
                                                                  将状态量分为三种类型
                                                                                     variable pose,在优化中会被更新
                                                                                     extrins pose 外参
                                        B. 带有在线标定的优化
                                                                                                                             Measurement Proprocessing (Section V) Initialization (Section VI)
                                        C. 纯里程计的优化
          VII. 多激光雷达的带有标定优化的里程计
                                                        利用退化因子来判断。
                                                                                                                                                                                   No Linear Reterion
                                                        退化因子为J^TJ的最小特征值     相关文章:On Degeneracy of Optimization-based State Estimation Problems 系统框图
                                                                                                                                                                                    and Translation
                                                                                                                                                                                      Calibration
                                       D. 标定收敛性监测
                                                        若退化因子大于设定的阈值,则认为当前的优化得到的外参为一个可行解。
                                                        收集一组这样的可行解外参,并且获得外参的平均值与协方差。
                                                   利用边缘化保留历史帧的信息, 并且作为先验加入到优化问题中。
                                        E. 边缘化
                                                                                                                                                                            Sliding Window
                                                                                                                                                      Calibrated?
                                                                    传感器噪声
                                                                                                                   Uncertainty-Aware Uncertainty Estimation
                                   认为被加入到地图中的三维点的噪声主要来源于
                                                                   退化位姿的估计
                                                                                                                                 and Propagation
                                                                                                                                                    Optimization with
                                                                                                                                                                    Optimization with
                                                                                                                                                                                    Monitoring the
          可知不确定性的多激光雷达建图
                                                                    外参扰动
                                                                                                                                                                    Online Calibration
                                                                                                                                                                                     Convergence
                                                                                                                                                     Page Odometry
                                   A. 不确定性传播
                                                                                                                                                  Multi-LiftAR Odometry with Calibration Refinement (Section VII)
                                                                                                                 Mahi-LiDAR Mapping (Section VIII)
                                   快速点云分割以去除噪声
                                   运动与外参初始化
                   本文所拥有的特性
                                   紧耦合的M-LO
                                   拥有不确定性的多激光雷达建图
                                  增加回环检测
                   未来的研究方向
                                  object-centric SLAM
                                                    构建SLAM算法同时估计自身运动与动态物体的运动
                                  将IMU,radar或者事件相机加入到框架中
                                         通过message_filter::Synchronizer同时订阅两个激光雷达的数据
                                                         msg转pointcloud
                                                                                                  给每个激光雷达的三维点赋一个0-1值,为这个点的时间戳相对于这一帧点云的相对时
                                                                            f_extract_.calTimestamp
                                                                                                  这个与A-LOAM一致
                                                                                                     用类似Lego LOAM的方法,给点云生成深度图
                                                                                                     深度优先搜索对上述深度图进行聚类
                                                                                                                               去除聚类中尺寸过小或者过大的。
                             Odometry
                                                                                                                                  -1表示对应的像素处无数据
                                                                            img_segment_.segmentCloud
                                                                                                     生成一个与上述图同样大的label_mat。
                                                                                                                                  999999表示无效的聚类
                                                                                                                                  否则表示这个像素属于的聚类的标号
                                                                                                     根据label_mat来去除点云中的无效点
                                                                                                 提取Edge点与Surf点
                                                                            f_extract_.extractCloud
                                                                                                 less_sharp 与less_flat点
                                                                                                                                  对于每个激光雷达,trackCloud以获得每帧的相对位移与绝对位姿
                                         线程sync_thread
                                                                                                                                  InitialExtrinsics::addPose
                                                                                                                                  将上面得到的每个激光雷达的相对位姿加入到待优化队列中
                                                                                                                                                                                              同论文 构建Ax=b的问题来求解旋转
                                                                                                                 如果没有先验外参
                                                                                                                                                   initial_extrinsics_.calibExRotation
                                                                                                                                                                                              Huber核的设置
                                                                                                                                                                                                             基雷达的旋转若与辅雷达的旋转的角度差超过5degree
                                                                                                                                                   标定其到主激光雷达的外参的旋转
                                                                                                                                                                               SVD分解求旋转
                                                                                                                                                                                                                                                 否则为1
                                                                                                                                                                                              如果Ax=0的A的零空间的秩为1
                                                                                                                                                                                               (第二小的奇异值大于设定的阈值)
                                                                                                                                                                                                                        设置这个激光雷达的旋转的协方差的状态为true
                                                                                                                                  对于每一个激光雷达
                                                                                                                                                                                通过在yaml文件里的配置,设置是否
                                                                                                                                                                                                               是, calibExTranslationPlanar
                                                                                                                                                                                激光雷达的轨迹是PLANAR_MOVEMENT
                                                                                                                                                    initial_extrinsics_.calibExTranslation
                                                                                                                                                                                                               否, calibExTranslationNonPlanar
                                                                                                                                                    标定其到主激光雷达的外参的平移
                                                                                                                                                                                 设置这个激光雷达的平移的协方差的状态为true
                                                                                                                                                 向滑窗中加入帧将当前的观测与位姿放到滑窗的末尾
                                                         estimator.inputCloud
                                                                                                                                      INITIAL
                                                                                                                                                如果滑窗中帧足够,则设置solver_flag_=NON_LINEAR
                                                                                                                                                                  优化变量加入variabel pose,设置第一个位姿固定
                                                                                                estimator.process
                                                                                                                                                                  优化变量加入外参,设置基雷达的外参固定
                                                                                                                                                                   MarginalizationFactor
                                                                                                                                                                   将边缘化信息加入到优化问题中。
                                                                                                                                                                                                         将基雷达的滑窗内的所有三维特征点转换到基雷达的Pivot坐标系下,并且添加到历史
                                                                                                                                                                                                         点云中构建局部地图
                                                                                                                                                                                                         随后进行局部地图的降采样。
                                                                                                                                                                                          buildCalibMap
                                                                                                                                                                                                          matchSurfFromMap/matchCornerFromMap
                                                                                                                                                                                                         将辅激光雷达的三维点与局部地图进行匹配,
                                                                                                                                                                                                         匹配的结果放在surf_map_features_与corner_map_features_里面。
                                                                                                                                                                                          将先验的外参作为先验factor键入到优化问题中。
                                                                                                                                                                                                                        LidarPureOdomPlaneNormFactor
                                                                                                                                                                  ESTIMATE_EXTRINSIC == 1
                                                                                                                                                                                                                        主激光雷达的特征点与主激光雷达的local_map关联
                                                                                                                                                                  如果需要优化外参
                                                                                                                                                                                          添加LidarPureOdomPlaneNormFactor
                                                                                                                 switch(solver_flag_)
                                                                                                                                                                                                                        LidarOnlineCalibPlaneNormFactor
                                                                                                                 这个flag初始为INITIAL
                                                                                                                                                                                          与LidarOnlineCalibPlaneNormFactor
                                                                                                                                                                                                                        辅激光雷达的特征点与主激光雷达的local_map关联,并且
                                                                                                                                                                                                                        同时优化位姿与外参
                                                                                                                                                                                          添加LidarOnlineCalibPlaneNormFactor
                                                                                                                                                                                          与LidarOnlineCalibEdgeFactor
                                                                                                                                                                                                                        同上
                                                                                                                                                    optimizeMap
 (以rosNodeRHD为例)
                                                                                                                                                                                          构建边缘化信息
                                                                                                                                                                                                        将辅激光雷达的点云转换到基激光雷达的Pivot坐标系下,并构建局部地图
                                                                                                                                                                                         buildLocalMap
                                                                                                                                                                   ESTIMATE_EXTRINSIC == 0
                                                                                                                                                                                                        将辅激光雷达的特征点与局部地图进行匹配
                                                                                                                                                                                                                                      子主题
                                                                                                                                                                  如果不需要优化外参
                                                                            processMeasurements
                                                                                                                                                                                         对于所有激光雷达的特征点,
                                                                                                                                                                                         仅添加LidarPureOdomPlaneNormFactor
                                                                                                                                                                                                并且分块判断J^TJ的特征值是否小于设定的阈值,如果是则设置该参数的对应方向已发
                                                                                                                                                                                                生退化
                                                                                                                                                                                                                                  Eigen::Matrix<double, 6, 6> mat_P = (mat_V_f.transpose()).inverse() *
                                                                                                                                                                  evalResidual()
                                                                                                                                                                                 evalDegenracy
                                                                                                                                                                                                                                  mat_V_p.transpose(); // 6*6
                                                                                                                                                                                                                                    if (local_param_ids[i]->is_degenerate_)
                                                                                                                                      NON_LINERA
                                                                                                                                                                                                                                     local_param_ids[i]->V_update_ = mat_P;
                                                                                                                                                                                                 对已经发生退化的参数块,设置其V_update_=
                                                                                                                                                                  ceres优化,并将优化结果保存
                                                                                                                                                                                  如果有last_marginalization_info_
                                                                                                                                                                                 则根据该info 构建MarginalizationFactor
                                                                                                                                                                  添加边缘化信息
                                                                                                                                                    slideWindow()
                                                                                                                                                    evalCalib()
                                                                                                                                                    检查标定是否已经收敛,如果是则设置
                                                                                                                                                                                       检测是否所有的外参收敛
                                                                                                                                                    ESTIMATE\_EXTRINSIC = 0
                                                                                                                                                    undistortMeasurements
                                                                                                                                                    点云去畸变
                                                                                                pubPointCloud
                                                                                                                        将每隔激光雷达的点云转换到基雷达下,
                                                                                                以Odometry的0.5倍帧率播放
                                                                                                                       合并后发布出去
                                                         特征点/Odometry结果/外参时间同步
                                                         transformAssociateToMap
                                                         根据当前的odom的输出以及Map到Odom的位姿
                                                         更新Map的transform
                                                         extractSurroundingKeyFrames
                                                         提取当前位姿附近的关键帧
                                                                                                   对每个特征点,找到地图中与其相关的点
                                                                                                                      根据位姿不确定性以及点自身的不确定性来传播一个点的
                                        mapping_process
                                                                               如果开启了不确定性估计
                                                         downsampleCurrentScan
                                                                                                                      不确定性。
                                                                                                                      参见论文VIII.A
                                                                                                   evalPointUncertainty
                                                                              优化的次数为两趟
                                                                                                对于每个特征点, 找其在地图中的对应点
                                                                              每隔10帧(约1s)
                                                                                                extractCov
                                                                             afs.evalFullHessian
                                                                                                提取协方差
                             mapping
                                                         scan2MapOptimization
                                                                                               每个点算JTJ,并相加
                                                                              如果logDet(H)小于特定阈值(42),则认为场景可能出现退化,gf_ratio=0.8。否则
                                                                              afs.goodFeatureMatching
                                                                                                  论文《Greedy-Based Feature Selection for Efficient LiDAR SLAM》里的方法,选择出足够数量的特征点
                                                                             对于surf_feature
                                                                                             构建LidarMapPlaneNormFactor
                                        pub_map_process
                                                        将上一帧的less_sharp特征与less_flat特征放入Kd-Tree中以供查询
                                                                                                                                                                                                                                                                             PriorFactor
                                                        设置初始位姿
                                                                                                                                                                                                                                                                             外参的初始值给优化问题添加的约束
                                                                                                                                                                                                PoseLocalParameterization的Jacobians
                                                                                     global维度为73维位移+4维四元数旋转
                                                                                                                                                                                                                                                                             LidarPureOdomPlaneNormFactor
                                                                                                                                                                                                与链接中的CSDN blog不同。
                                                                      设置优化参数
                                                                                                                                                                                                                                                                             主激光雷达的特征点与主激光雷达的关联
                                                                                    local维度为6 3维位移+3维旋转
                                                                                                                                                                                                                                                                             LidarOnlineCalibPlaneNormFactor
                    LidarTracker
                                           trackCloud
                                                                                                                             在上一帧的less_sharp点中找最近点
                                                                                                                                                                                                                                                                             辅激光雷达的特征点与主激光雷达的local_map关联
                  用于计算两帧点云之间的运动
                                                                                                                             然后找不同线上的其他最近的点
                                                                                 f_extract_.matchCornerFromScan
                                                                                                            对于每个corner点
                                                                                                                                                                                                                                                                             MarginalizationFactor
                                                                                                                                                                                                                                                      MLOAM中的factors
                                                                                                                                                                                                                                                                             边缘化因子
                                                                                                                                                                                                                                                                                              子主题
                                                                                                                             将这两个点作为该corner点的优化问题的coeff
                                                                      特征匹配
                                                                                                                          在上一帧的less_flat点中找最近点
                                                                                                                                                                                                                                                                             LidarMapPlaneNormFactor
                                                                                                                                                                                                                                                                                                   仍然计算的是点到面的残差,不同的是,如果这个点的协方差过大,则会对其残差乘以
                                                        构建ceres问题
                                                                                                                                                                                                                                                                             局部点到地图配准的因子
                                                                                                                                                                                                                                                                                                    一个系数,降低其在优化问题的比重。
                                                                                  f_extract_.matchSurfFromScan
                                                                                                                          然后找不同线上的两个最近点
                                                                                                           对于每个surf点
                                                                                                                                                                                                                                                                                                 仍然计算的是点到面的残差,不同的是,如果这个点的协方差过大,则会对其残差乘以
                                                                                                                                                                                                                                                                             LidarMapEdgeFactor
                                                                                                                          将这三个点形成的平面的参数作为这个surf点的coeff(ax+by+cz+d=0)
                                                                                                                                                                                                                                                                                                 一个系数,降低其在优化问题的比重。
                                                                                                                                                                                                                                                                             局部点到地图配准的因子
                                                                                                  surf的残差为点到面的距离向量
                                                                                   对于每个surf特征
                                                                      构建残差块
                                                                                                     残差为点到直线的距离的向量
```

对于每个corner特征

ceres优化

<mark>与论文中不同</mark>