

【Café 速递】李加元：点云配准与激光里程计

核心提示：SLAM 技术是无人系统自主定位的关键技术之一。本报告从激光点云数据出发，描述了基于特征的点云粗配准方法和稳健对称 ICP 变种精配准方法，并进一步介绍了如何构建一个性能 SOTA 的激光里程计。

主持：高天乙 摄影：高天乙、林艺琳 录像：张崇阳 文字：沈张骁

>>>人物名片

李加元，副研究员、硕士生导师。2008 年至 2018 年期间于武汉大学遥感信息工程学院获得本硕博学位，并入选“博士后创新人才计划”。主要从事摄影测量、机器视觉及遥感图像处理研究。研究成果获得了国际摄影测量与遥感学会 (ISPRS) 2021 年度最佳青年作者奖和美国摄影测量与遥感学会 (ASPRS) 2018 年度 TALBERT ABRAMS AWARD。在 IEEE TPAMI、IEEE TIP、ISPRS JPRS、IEEE TGRS、《测绘学报》等国内外高水平期刊发表论文 30 余篇；长期为 IEEE TSP、IEEE TIP、IEEE T-GRS、ISPRS JPRS、IEEE J-STARS、IJRS 等二十余个国际 SCI 期刊担任审稿人。

>>>嘉宾小语

- ◇ 稳健估计在几何感知里面的应用非常广泛，它的应用场景也是非常多的，只要需要用到位置和姿态估计的这些基本都离不开。
- ◇ 激光里程计，就是我们这个激光 SLAM 的前端。

>>>报告现场

2021年10月22日晚7时，武汉大学遥感信息工程学院李加元副研究员做客 Geoscience Café 第309期讲座。他从激光点云数据出发，描述了基于特征的点云粗配准方法和稳健对称ICP变种精配准方法，并进一步介绍了如何构建一个激光里程计。李加元详细地介绍了自身的最新科研成果，吸引了同学们的热烈讨论和学习。



图1 李加元作精彩报告

讲座主要分为四个部分：稳健估计模型、特征级点云匹配、非特征点云配准和激光里程计。



图2 观众认真听讲座

稳健估计模型

稳健估计，就是从被污染的观测值中正确地拟合出几何模型参数。这种方法在几何感知中应用广泛，服务于自动驾驶、机器人探索、三维重建等领域。

现有的稳健估计的方法主要分为两大类：**RANSAC** 方法和 **Robust** 估计法（以 **M-估计** 为代表）。两种现有方法都具有较多的局限性：**RANSAC** 方法只能求出近似解，不适用于多观测量，效率较低；**Robust** 估计法无法处理高比例粗差，且易陷于局部最优。



图 3 稳健估计的应用示例

基于此，李加元老师提出了新的处理模型，**Q-范数模型**与**统一模型**。**Q-范数模型**采用 **Q-范数**取代最小二乘的代价函数。如加入权值，则为**加权 Q-范数模型**。

考虑到最小二乘代价呈二次增长且非稳健，而 **M-估计** 赋予小权值不参加优化，可能导致优化过程发散的问题，李加元老师对其进行改进，建立了**统一模型**。通过稳健控制参数 α ，观测值残差 r 与比例因子 β 等参数建立基本代价函数模型和权函数模型，采用自适应选权迭代法进行优化得到目标函数。

这两种求解模型经过实验验证，在近似均匀分布的高比例（80%-90%）粗差当中取得了较好的结果。

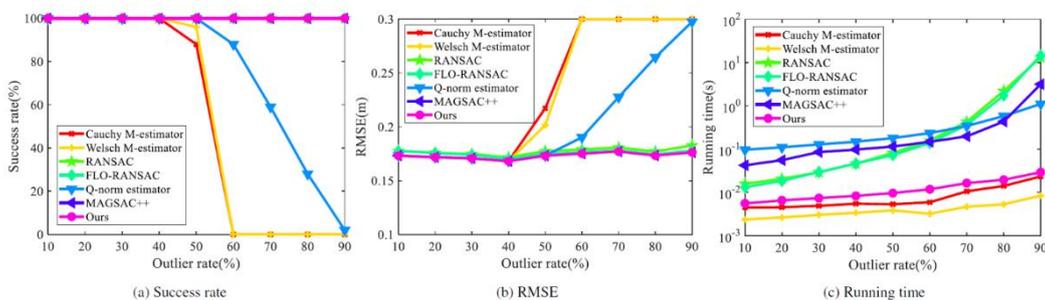


图 4 模型的部分实验验证结果

特征级点云匹配

第二部分，李加元老师介绍了 SLAM 技术的主要应用和关键技术。

SLAM 技术就是利用当前时刻与之前时刻的观测信息进行匹配，恢复载体位置和姿态信息而实现建图的过程，主要分为视觉 SLAM 和激光 SLAM。点云匹配是激光 SLAM 的关键步骤，需要将得到的三维模型的独立坐标系统一到一个坐标系中，主要包含配准和融合两部分，李加元老师介绍的重点是点云配准，主要包含粗配准和精配准。

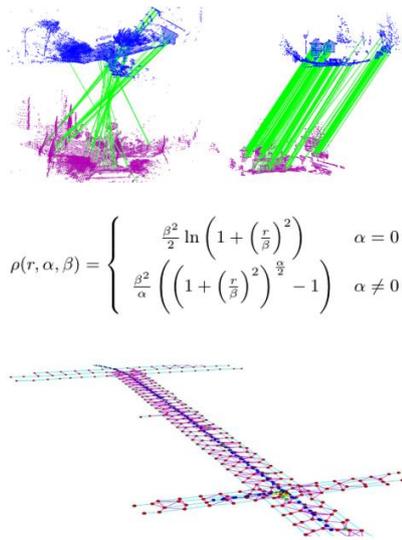
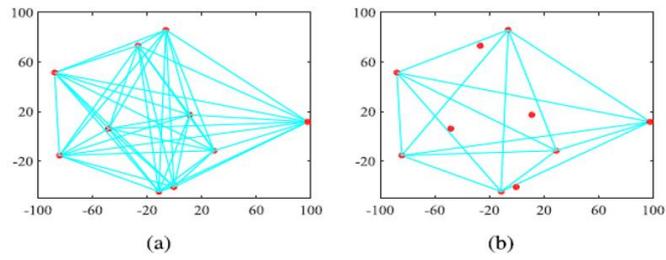


图 5 SLAM 示意图

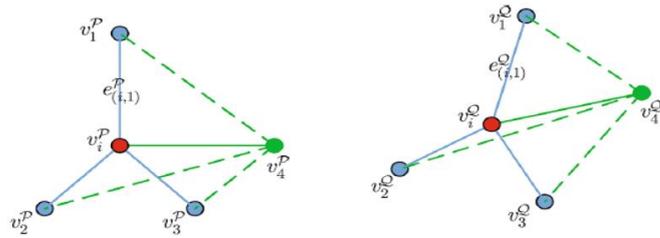
对比传统 ICP 配准算法和 3D 配准方法之后，李加元老师提出了一种更好的特征级配准方法：通过特征点和描述构建初始匹配，得到全连接图，投票过滤部分错误匹配点，再通过 Q-范数模型求解旋转，剩余一个平行向量，进行第二次点的投票得到结果。

第二个工作是提出了一种 RANSAC 的变种方法：采用图匹配的方法优化采样结果，再放入稳健估计模型中求解几何参数。这种方法当粗差比例很大时（如 99%），相比 RANSAC 方法可以将速度提高两到三个量级。

第三个思想是首先只剔除确定是错误的点，只留下正确的点和少量的错误点。李加元老师提出了匹配矩阵和扩展匹配矩阵的概念，通过它们所确定的上、下界值之间的冲突来判断错误点。该方法在 ETH 的开放数据集上测试，结果精度较高，且面对大量数据时，效率是 RANSAC 方法的数百倍。



特征点两两连接构成全连接图



支持线投票：得票越高，为正确匹配的概率越大

图6 全连接图与支持线投票

非特征点云配准

粗配准的精度仍然不满足需求，需要进行精配准，李加元老师随后提出了精配准的优化方法。传统的方式中主要有点到点、点到面的度量两种方式，但具有收敛速度慢、区间小的缺陷。为此，李加元老师构建了一种新的度量标准：对称度量。其零集不仅包含局部平面，还包含局部曲面，于是具有零集大，收敛快速且成功率高的优势。

实际问题中，为使模型对部分重叠和粗差敏感，李加元老师选择加入稳健函数来处理。相比近年提出的其他方法，这一方法在保证精度的同时，迭代次数和所需时间均更少，具有优势。

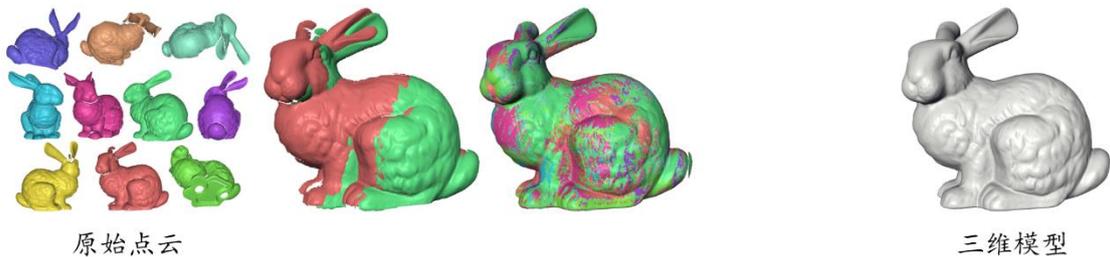


图7 点云配准过程示意图

激光里程计

在之前所讲的特征级、非特征级点云匹配的基础上，李加元老师将其进行结合，构建了一个激光里程计。

激光里程计主要包含三个线程：一是特征级的帧对帧的匹配，二是根据这些特征构建子图，然后将子图与当前特征匹配。最后一个是非特征级的，子图与地图的匹配。该模型在 KITTI 训练集上进行测试，得到的结果具有较好的精度，排名位居所有团队的前列。

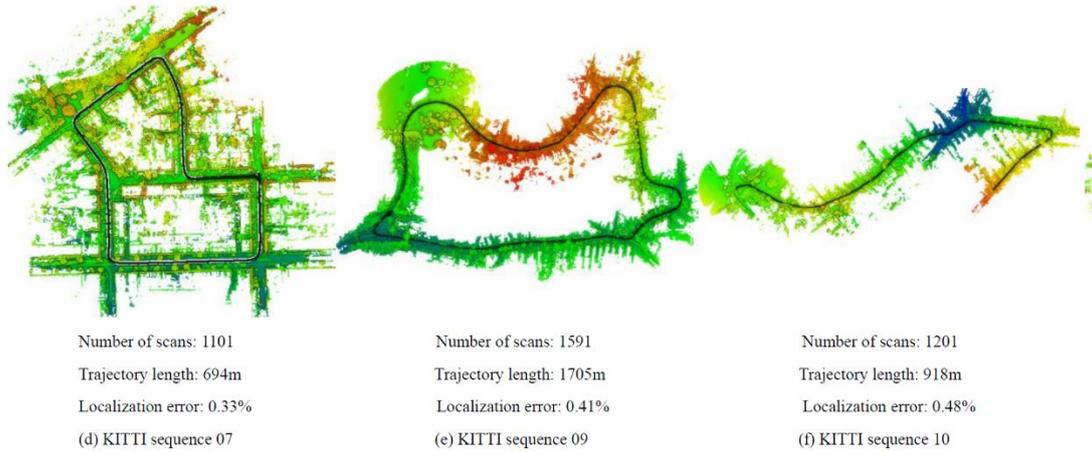


图 8 KITTI 训练集上的实验验证

>>>互动交流

提问人一:请问为什么要求粗差均匀?是否可以认为,只有一个正确的模型,但是粗差比例很高时,使用模型剔除了一部分的粗差,但剩余的粗差可能还会有一个模型?

李加元:我这里所说的均匀,是一种近似均匀,主要是来剔除里面存在多个几何模型时,另外一个模型可能对它产生干扰。我刚才也列了一些真实的实验,在图像匹配或点云匹配得到特征点,也基本都是满足近似随机分布的。

我确实要排除你说的情况,但不是你理解的那样子。比如说一幅图片,这边有匹配点,那边有也匹配点,当用一个单一模型去估计的时候,就可能得到两个模型,两边的点其实都是正确的,但是如果用这个模型估计,可能把其中一部分给剔除了,用 RANSAC 也有类似的这种情况。



图9 同学们积极提问

提问人二:请问您提出的稳健估计函数用于激光点云的匹配,与 TEASER++ 有什么区别吗?

李加元:TEASER++我们也进行对比了,它采用 TLS 进行估计,但是不知道他的稳健函数能处理多少比例的粗差,并且有部分采用了时间复杂度是次数四次方的算法,而我们这个最多也只是二次方的。

提问人三:现在激光里程计和视觉里程计的误差分析是基于什么样的方法?比如和惯导组合的时候如何定权?激光和惯性里程计的权重怎么分配呢?

李加元:我们一般采用滤波的方法来定权,比如 IMU 和激光的融合,一般都是采用卡尔曼滤波,然后把 IMU 和我们的那些东西都加到一个因子图去一起优化。

提问人四:刚才看您讲你的方法基本都是基于特征点的,那么这个特征点怎么找?

李加元:特征点提取的方法很多,有传统方法,也有深度学习方法,你可以自行搜索合适的方法。



图 10 李加元老师（第一排左三）与部分听众、GeoScience Café 团队成员合影留念

GeoScience Café 以“谈笑间成就梦想”为目标，于每周五晚 7:00 在实验室四楼休闲厅，邀请 1-4 位嘉宾，为大家带来学术报告或经验分享。报告内容包括摄影测量与遥感、地理信息系统、导航与定位服务等研究方向，听众可在报告结束后向嘉宾提问、与嘉宾交流探讨，同时每学期还会举办 2 期人文类讲座和 2 场导师信息分享会。每期报告会根据嘉宾意愿在 B 站开设直播，使不能来到现场的听众同步参与。报告 PPT 和视频会在征得嘉宾同意的情况下在 qq 群和 B 站上发布。

更多精彩内容（讲座预告、讲座回顾、报告 PPT、报告视频）敬请通过以下方式获取：



QQ群



微信公众号



B站直播