

适用于无人驾驶车辆的地图构建与道路提取算法研究

2017 年 12 月

中图分类号：TP391.41

UDC 分类号 : 621.3

适用于无人驾驶车辆的地图构建与道路提取算法研究

作者姓名	*****
学院名称	*****
指导教师	****教授
答辩委员会主席	****教授
申请学位级别	工学硕士
学科专业	*****
学位授予单位	北京理工大学
论文答辩时间	2017 年 12 月

Research on map building and road extraction algorithm for UGV

Candidate Name: ****

School or Department: ****

Faculty Mentor: Prof. ****

Chair, Thesis Committee: Prof. ****n

Degree Applied: Master of science

Major: ****

Degree by: Beijing Institute of Technology

The Date of Defence: December, 2017

适用于无人驾驶车辆的地图构建与道路提取算法研究

北京理工大学

研究成果声明

本人郑重声明：所提交的学位论文是我本人在指导教师的指导下进行的研究工作获得的研究成果。尽我所知，文中除特别标注和致谢的地方外，学位论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含为获得北京理工大学或其它教育机构的学位或证书所使用过的材料。与我一同工作的合作者对此研究工作所做的任何贡献均已在学位论文中作了明确的说明并表示了谢意。

特此申明。

签名：

日期：

关于学位论文使用权的说明

本人完全了解北京理工大学有关保管、使用学位论文的规定，其中包括：①学校有权保管、并向有关部门送交学位论文的原件与复印件；②学校可以采用影印、缩印或其它复制手段复制并保存学位论文；③学校可允许学位论文被查阅或借阅；④学校可以学术交流为目的，复制赠送和交换学位论文；⑤学校可以公布学位论文的全部或部分内容（保密学位论文在解密后遵守此规定）。

签名：

日期：

导师签名：

日期：

摘要

电子地图为地面无人驾驶车辆（UGV）定位、地形估计和场景理解提供路面环境等信息，是UGV进行自主决策和全局路径规划的重要组成部分。当前大部分电子地图无法在非结构化环境或复杂任务中使用，且存在更新周期长、道路网络精度低等缺点，无法满足UGV自主导航需求，因此需要设计适用于UGV的高效地图构建方法。大部分UGV依赖电子地图中精确拓扑路网完成路径引导，但地图中道路信息无法直接应用于UGV，而人工提取绘制的方法严重限制UGV的大范围应用，所以需要从构建的地图中提取道路网络，提高UGV导航规划能力。

针对这一问题，本文提出一种解决方案，旨在由一系列图像生成二维或三维地图，同时提取其中的道路区域，使得UGV可以依据地图提供的先验信息完成全局路径规划等任务，本文从二维、三维地图构建以及二维图像的道路提取几个方面展开论述。

1. 本文提出由全景图像构建二维地图的方法，首先通过车载全景相机与高精度定位系统，采集全景图像与其对应的车辆定位信息；而后将全景图像由球面坐标系转换到车体坐标系中，得到以UGV为中心俯视效果的逆透视投影（IPM）图；之后依据车辆定位信息将一系列IPM图拼接为大范围二维场景地图。基于此，在GIS数据库中构建包含道路拓扑网络的电子地图，并添加道路的各种属性信息，为UGV全局路径规划与自主导航提供道路及先验信息。

2. 本文介绍基于多视图几何算法对航拍图像进行地理空间三维重建的方法，首先提取航拍数据集中的图像特征点，而后基于近似最近邻算法计算特征点的匹配关系，并采用对极约束过滤错误的匹配点，完成无序图片的“有序化”。其后使用多视图几何算法，从匹配特征点数目最多的两张图像开始重建，并增量式的加入其余图像，最终完成整个地理空间的三维重建过程。在相机位姿与3D点坐标的优化过程中，相对于传统的最小化重投影误差，本文增加了最小化相机中心距离，优化相机的旋转与平移矩阵。针对航拍图像分辨较高的特点，采用基于块的点云稠密方法计算图像的深度图，最后通过深度图融合得到稠密点云地图。

3. 基于上述工作，提出一种从二维图像中提取道路的方法，首先选取一部分图像的道路区域作为训练样本，根据道路的光谱特征，使用最小二乘法拟合训练样本得

到道路二值图像。其次，采用开闭运算等多种算法平滑二值图，设计多边形检测的方法以去除房屋边缘等非道路区域的干扰。由于拓扑道路网络更易于UGV进行全局路径规划，所以采用拓扑细化的方法将道路二值图像转化为由单像素构成的道路网络，最后根据拓扑长度去除单像素道路中的短枝丫，得到最终的拓扑路网。

4. 为验证本文算法的有效性，搭建地图构建、道路提取的实验平台，并采用多个数据集验证算法的效率和精度。首先本文展示构建的大范围二维地图以及应用于UGV全局路径规划的效果，而后通过两个图像数据集得到三维地理空间地图并分析该方法构建地图的精度，最后计算得到道路拓扑的提取精度，通过实验验证本文提出的方法在不同场景的有效性。

关键词：Structure from Motion (SfM); 三维重建; 无人驾驶车辆; 地图构建;
道路提取

Abstract

The digital maps provide road information for Unmanned Ground Vehicles (UGV) positioning, layout estimation and holistic scene understanding. It is an important part of UGV's self-decision and global path planning. Most current digital maps are still inadequate for advanced applications in unstructured environments. Lack of up-to-date information and detailed road networks are among the most important shortcomings. That is unable to meet the need of UGV's autonomous navigation. Therefore, we need to design an efficient map-building method for UGV. Most UGV's rely on road networks of the detailed maps of the environment to facilitate navigation and perception. However, the roads in the map can not be applied to UGV's navigation directly, while the methods of manual intervention limits the applicability of current approaches. It is urgent to extract road topological networks from the building map for improving the capabilities of UGV's autonomous navigation and planning.

In order to solve the problem, this paper aims to generate a two-dimensional or three-dimensional map from a serial of images and to extract the road area, so that UGV can accomplish the task of planning based on prior information. In this paper, the construction of the 2D and 3D map and the extraction of the road from a 2D image are described.

1. The paper presents a method of building a 2D map using panoramic images. The panoramic camera and the high-precision positioning system are fixed on the unmanned vehicle, which can acquire the panoramic images and the corresponding vehicle positioning information. The panoramic image is converted from the spherical coordinate system to the vehicle-based coordinate system to obtain an overhead view centered on the unmanned vehicle, which is called inverse perspective mapping (IPM). And then a series of IPM images are spliced into a large-scale 2D map according to the position from high-precision positioning system. Based on the map, topology network of 2D map is created after adding a variety of attributes of roads. The map containing is regarded as the basis for unmanned navigation and decisions, offering the road and other prior information.

2. A method is presented to reconstruct the 3D structure of geospatial space from aerial images using multi-view geometric. It includes feature extraction from the aerial image

datasets, and feature matching of different images according to the feature points. Epipolar constraint is adopted to remove false matches so that the unordered datasets become "orderly". Afterwards, the multi-view geometry algorithm was used to reconstruct two images with the largest number of matching feature points. And then the rest of the images are added incrementally, completing the 3D reconstruction of the entire geospatial space finally. In the process of optimization for 3D points and camera poses, the paper not only minimizes the re-projection error of 3D points, but also minimizes the distances between the camera centers and the GPS positions. The optimization operations refine the camera poses and sparse point cloud composed of 3D points to decrease the error of models. The dense point clouds are obtained by calculating the depth-maps and merging them, which can be applied to UGV's navigation and planning.

3. Based on the above work, a method of extracting roads from 2D images is proposed. Firstly, a part of road image is chosen as the training sample the least square method is applied to. And then spectral features of the training sample are fitted and applied to the other sample to obtain the road binary image. Secondly, open and close algorithms are adopted to smooth binary image. And the method of polygon detection is designed to remove the interference of non-road areas, such as house edges. Then the road binary image is converted into a road network composed of single pixels by topological thinning. Finally, the final topology of the road network is gained by removing the short branches in the road network.

4. In order to validate the effectiveness of the proposed algorithm, the experimental platforms for map construction and road extraction are set up. The efficiency and accuracy of the algorithm are verified by using multiple datasets. Firstly, the effect of the 2D constructed map on the UGV's global path planning is demonstrated through experiments. By using two image datasets, we can reconstruct them to 3D geospatial maps and analyze the results of experiments to get the accuracy of the map-building method. Finally, the precision of the road topology is calculated. The validity of the proposed method in different scenarios is verified by experiments.

Keywords: Structure from Motion (SfM); 3D reconstruction; UGV; Map building; Road extraction

目录

第1章 绪论	1
1.1 研究背景与意义	1
1.2 国内外研究现状	4
1.2.1 地图构建方法研究	4
1.2.2 道路提取方法研究	6
1.3 主要研究内容	8
1.3.1 二维与三维地图构建	8
1.3.2 二维图像中的道路提取	9
1.4 本章小结	9
第2章 基于全景图像的高精度地图构建	11
2.1 引言	11
2.2 传感器数据采集	11
2.2.1 传感器选取	11
2.2.2 定位信息编码	12
2.3 全景图像处理	13
2.4 地图的构建与使用	16
2.4.1 图像拼接	16
2.4.2 基于GIS数据库生成无人驾驶车辆行驶地图	18
2.5 本章小结	18
第3章 基于无人机航拍图像的三维地图构建	20
3.1 引言	20
3.2 相机模型	20
3.3 相关坐标系	22
3.4 特征点提取	27
3.5 特征点匹配	30
3.6 多视图重建	36
3.6.1 两视图重建	37
3.6.2 三角定位法	41
3.6.3 2D-3D位姿求解	43

3.7 三维重建中的优化 ······	45
3.7.1 光束平差法 ······	45
3.7.2 最小化相机中心位置误差 ······	48
3.8 稀疏点云的稠密化 ······	49
3.8.1 深度图计算 ······	50
3.8.2 深度图融合 ······	52
3.9 本章小结 ······	53
第 4 章 二维图像中的道路提取 ······	54
4.1 引言 ······	54
4.2 图像二值化 ······	54
4.3 非道路区域移除 ······	55
4.3.1 开闭运算 ······	55
4.3.2 轮廓提取 ······	56
4.4 拓扑处理 ······	57
4.4.1 拓扑细化 ······	57
4.4.2 拓扑精炼 ······	58
4.5 本章小结 ······	59
第 5 章 实验结果分析 ······	61
5.1 引言 ······	61
5.2 全景图像构建地图实验结果 ······	61
5.2.1 全景图像地图实验平台搭建 ······	61
5.2.2 全景图像地图构建效果及精度分析 ······	61
5.3 地理空间三维重建实验结果 ······	63
5.3.1 地理空间三维重建实验平台搭建 ······	63
5.3.2 三维重建效果及精度分析 ······	63
5.4 道路提取精度分析 ······	67
5.5 本章小结 ······	68
总结与展望 ······	70
参考文献 ······	72
攻读硕士学位期间发表论文与研究成果清单 ······	76

第1章 绪论

1.1 研究背景与意义

智能移动机器人可以独立或辅助人类完成很多任务，这依赖其对环境的感知、导航和运动规划等过程。地面无人驾驶车辆（UGV, Unmanned Ground Vehicle）作为一种智能移动机器人，未来将在解决城市交通拥堵、灾区救援等方面发挥重要作用。UGV在未知环境自主导航时，对感知、规划等的要求更高，所以一般UGV都依赖高精度电子地图完成自主导航^[1]。当前大部分电子地图无法在非结构化环境或复杂任务中使用，且存在更新周期长、道路网络精度低等缺点，这限制了UGV的广泛应用，所以需要设计适用于UGV的高效地图构建方法。目前无人驾驶领域构建高精度地图的方法较多，一般采用车载或机载传感器等设备，总体上可以分为基于摄像头和基于激光雷达两种方案。

近年来实时定位与地图构建（SLAM, Simultaneous Localization and Mapping）作为移动机器人构建地图的方法获得长足发展，较为著名的有ORB-SLAM^[2]，LSD-SLAM^[3]，LOAM（Lidar Odometry and Mapping）^[5]等，图 1.1是运用车载传感器得到的三维地图，其中左图使用的传感器是激光雷达，右图使用的传感器是单目摄像头。这种采用车载传感器的构图方法已经发展得较为成熟，但是运用车载传感器得到大范围地图仍有困难，这是由于车载传感器视野受限、易受遮挡，当行驶区域发生道路阻塞而车辆无法通行时，道路信息采集受到限制，而且使用车辆遍历所有道路的方法效率低下。然而无人机飞行灵活，视野宽阔，可以高效地拍摄地面情况并通过算法建立地理空间地图，为UGV自主导航提供先验信息。

与视觉SLAM类似，SfM（Structure from Motion）也是一种构建三维场景的技术，SfM能通过2D图像得到场景3D 结构，然而SfM更多使用无序图片，采用离线处理的方式，能够构建比SLAM更精确的3D地图。与传统的航空激光扫描（ALS, Airborne Laser Scanning）和LiDAR（Light Detection And Ranging）绘制地图相比，SfM不仅可以得到更高分辨率的包含空间纹理的3D模型，而且得到如此丰富的数据结果使用的设备更廉价。这是由于SfM使用算法匹配图像特征点，计算相机位姿，从而重建拍摄场景的“稀疏”3D点云，而后通过MVS（Multi-View Stereo）将点云稠密化，并渲染得到逼真的三维地理空间模型^[6]。基于此，SfM作为一种地形测绘技术被广泛应用于

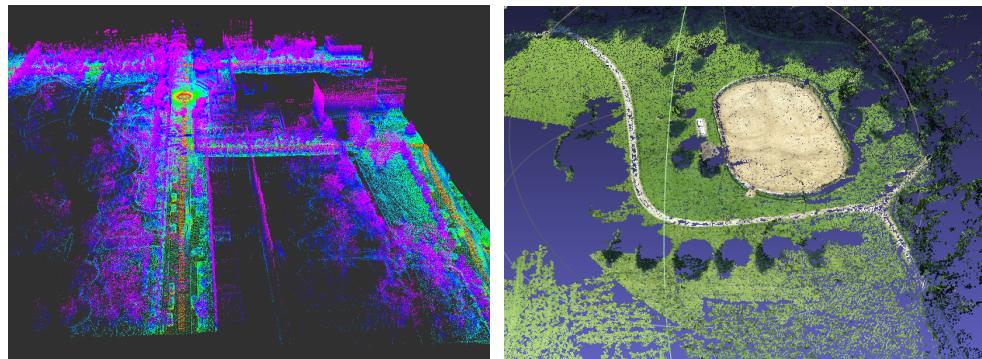


图 1.1 高精度地图

地理科学中。通过学术文献数据库Web of Knowledge，我们可以查看SfM学术研究情况，从1995年至2015年共有1000条关于Structure from Motion主题的记录。其中隶属计算机科学范畴的最多，而隶属地理科学范畴的记录数量排在第9名^[6]，从折现图中可以看出近年来地理科学领域SfM的研究主题增长迅速，且在所有学科的占比也增加，详细数据如图 1.2 所示。

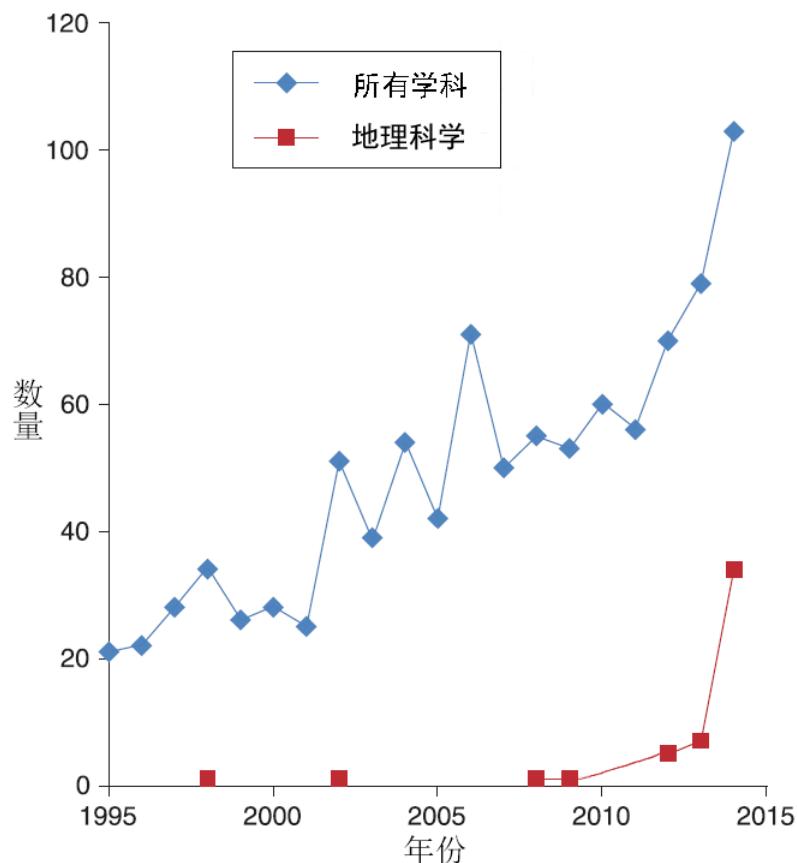


图 1.2 SfM主题统计曲线图

在UGV自主导航中，地图中的道路信息显得尤为重要，道路信息决定了UGV使用的规划模型和决策方案等，但是SfM构建的三维地图无法直接用于UGV导航规划，采用人工提取绘制的方式由于效率低、精度差而严重限制了UGV的普及。所以需要研究更有效地提取地图中道路区域的方法，为UGV自主导航规划提供先验信息。近年来道路提取跟踪在UGV 导航与地形分类等领域广泛应用，这些算法针对UGV车载传感器获取的图像取得良好效果，然而对于俯视视角的地理图像，这些算法基本失效。这是因为UGV 相机视野方向水平，其视野中道路一般收敛为消失点，针对消失点的提取道路的方法无法应用于俯视视角的航拍图像中。对于航拍地图中提取道路，需要分析道路区域的如下特征：

- (1) 光谱特征：道路区域的光谱与大部分的非道路区域有着明显的不同，具体表现在道路区域的RGB通道值在三维空间的分布差异。
- (2) 几何特征：道路区域通常是狭长的区域，道路宽度变化不会特别明显，而且道路的曲率也不会超过一定的限度。
- (3) 辐射特征：对于单一的道路区域或非道路区域，其颜色比较均匀，灰度值的方差较小；如果同时包含道路和非道路区域，则因为其光谱特征差异明显，灰度值的方差较大。
- (4) 拓扑特征：一幅卫星影像图中的道路区域会呈现出一定的拓扑结构，并且会交叉形成结构化的道路网络，具有一定的拓扑特征。

目前，结构化道路网络的提取过程主要包括图像预处理、道路边缘提取、道路二值化、道路骨架提取等步骤。道路提取总体方案主要采用全自动或者半自动的方法，全自动方法不需要人工干预、速度较快，但是由于地图道路区域较为复杂，因此提取的效果欠佳；半自动的结构化道路提取^[7]将自动提取过程与人工干预相结合，在道路提取的初始时刻人工选取道路区域的初始点或初始区域并进行迭代，或者加入人机交互，对自动道路提取方法得到的道路网路进行后续的处理，完善自动提取得到的道路骨架。

综上，本文将采用SfM构建三维地理空间地图，为UGV在未知区域自主导航提供先验信息，利用道路区域的特征，提取道路拓扑网络，通过提取的道路网络构建适用于UGV 的电子地图，为无人驾驶路径规划、自主导航、感知定位服务。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 地图构建方法研究

数字地图是进行路径规划与自主决策的重要信息源，构建适用于UGV导航的地图是无人驾驶领域的关键技术之一。许谦^[8]利用3D激光雷达和摄像头获取UGV环境信息，将得到的环境感知质点模型与环境感知区域添加到GIS（Geographic Information System）数据库中，实现基于GIS的地图动态更新的过程。宋晓虎^[9]构建基于OpenStreetMap（OSM）的电子导航地图，将SRTM（Shuttle Radar Topography Mission）高程数据巧妙添加到原始OSM地图信息中，合并多层平面金字塔图与多级精度高程图获得立体地图。百度公司的地图车使用高精度定位系统与高精度3D 激光雷达绘制三维场景并通过激光点云提取道路的车道线，使高精度地图达到车道级精度，这种方法也被广大无人驾驶厂商采用，但是地图车价格昂贵，同时该方法不适合野外环境的地图采集。

近年使用SLAM技术进行实时地图构建的方法被越来越多的无人驾驶研究机构采纳，李玉^[10]使用车载3D激光雷达获得稠密点云信息，采用迭代最近点（Iterative Closest Points, ICP）算法求取相邻帧3D点云的旋转平移关系，并评估得到的拼接点云中每个粒子的优劣，选择最优粒子加入全局地图，通过匹配拼接激光雷达数据获得地理空间的三维结构。段华旭^[12]采用双目视觉基于ORB特征提取和BoW（Bag of Words）模型闭环检测的方法，对地理空间进行三维重建，后端通过高斯-牛顿迭代法最小化三维场景的重投影误差，在优化重投影误差过程中考虑误差函数雅各比矩阵的稀疏性，从而加快整个优化过程。张毅^[13]围绕环境构图相关问题，提出了环境建图中基于粗集理论的数据融合算法，探索了构图过程中二维地图全新表示方法。邹智荣^[14]提出动态环境下自主车SLAM技术，针对大部分SLAM构图是基于静态环境完成的，本文提出了使用数据关联技术消除动态障碍干扰的方法，区分静动态障碍，并通过实验验证动态SLAM的有效性。

由于无人机的视角优势，使用无人机进行地图构建更加灵活高效，谢斌^[15]提出使用无人机通过D-S证据理论在未知环境构建适航地图的方法，该方法有效提高无人机对地面目标跟踪的准确性。刘洋^[16]为解决无人机路径规划问题，提出改进的概率地图模型，使用蚁群算法增加概率地图窄通道的采样点数量，获得可以覆盖规划环境的概率决策地图。陈含欣^[17]采用自适应重采样FastSLAM算法，利用无人机进行视觉

定位与3D构图。蒙山^[18]提出一种基于几何特征的视觉三维重建SfM方法，使用单目相机基于二维直线匹配生成三维空间直线，并通过点线特征结合及直线增强算法减少三维空间表达的冗余信息。马跃龙^[19]借助SLAM技术得到无人机航拍视频关键帧间的相机关系，据此得到关键帧间的单应性关系，最后得到二维图像的拼接结果形成正摄影地图。杨详红^[20]针对传统被动SLAM构图低效性，在SLAM中加入规划的思想，使构图更加高效。

在移动机器人地图构建领域，国外的研究起步较早，Leonard^[4]提出使用移动机器人的机载传感器实现同时定位与构图的过程，虽然使用的传感器是水下声呐，但与当前视觉、激光SLAM算法相似。Typiak采用SICK等多传感器进行信息融合构建地图，提高UGV远程控制性能。Cole^[21]使用3D激光雷达采集数据，使用简单的分割算法将点云分类并将点云转换到车体坐标系下，提出了一种新的点云配准算法，可以更鲁棒地将点云拼接为三维地图。Diosi^[22]使用激光雷达和声呐为移动机器人物图导航，使用问答式的人机交互为地图添加语义特征，同时使用Kalman滤波器融合雷达与声呐信息，创建带有语义特征的地图为机器人导航。近来随着计算机性能的提升，基于视觉的三维重建技术得到很大发展，使用网络上大量图片构建三维场景成为可能。Snavely^[23]设计了交互式可浏览查看图片的3D重建系统，拥有良好的用户体验，虽然网络上的图片具有不同相机模型、水印、清晰度、光线等，但该系统解决了图像多样性带来的问题，完成场景建模得到稀疏点云图。著名的“一日重建罗马”^[24]就是通过网络上不同类型的图片重建罗马的各个景观，使用并行计算的方法提高运行效率，一天内可处理超过15万张照片，图1.3展示重建得到罗马三维结构。

针对传统SfM耗时多、效率低的缺点，Wu Changchang^[25]提出线性时间的增量式SfM算法，针对增量式SfM时间复杂度较高的缺点，提出了一种新的光束平差（Bundle Adjustment, BA）优化方法，使时间复杂度降为原来的1/4，同时兼顾构图准确性。同时Wu Changchang^[26]使用GPU加速SfM算法光束平差过程，通过PCG（Preconditioned Conjugate gradients）改进非线性最小二乘求解过程，最大化利用CPU进行并行计算等。

从以上研究现状可以看出构建地图的方法多种多样，没有统一的标准格式，甚至为满足特定需要而构建的地图在其他机器人上无法使用，但是总体而言可以分为两类，一种是使用激光雷达，另一种是使用双目视觉或单目视觉构建场景地图。3D激光雷达具有测距准确、精度高等特点，同时对点云分类算法的改进使实时构图三维语

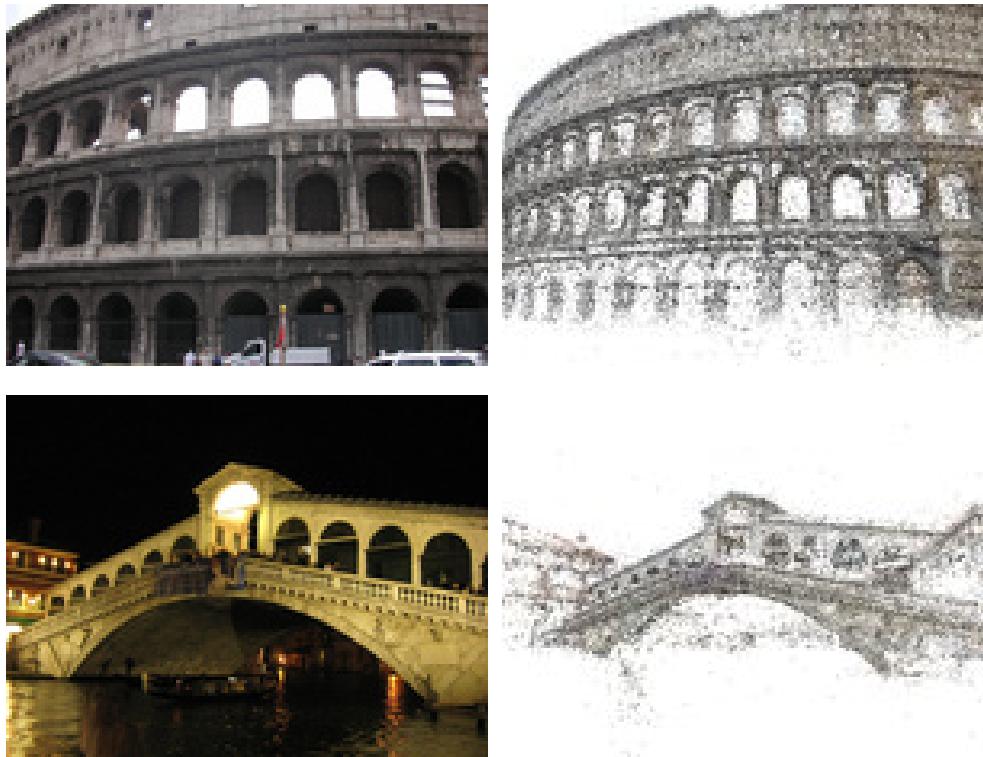


图 1.3 一日重建罗马

义地图成为可能，但是激光雷达价格昂贵，制约了其大范围商业化应用。使用视觉传感器，无论双目单目甚至三目基本原理相似，可以用于实时导航构图，但要获得稠密而精确的点云，类似图 1.3一般需要离线处理，因为其中涉及到匹配优化问题很难在现有计算条件下完成。

1.2.2 道路提取方法研究

道路作为移动机器人导航规划的重要依据，无论事先提取道路添加到地图中作为机器人规划的先验信息，还是实时提取道路区域引导移动机器人导航，道路提取都至关重要。这方面的研究很多，由于遥感图像视野开阔，包含信息丰富，使用遥感影像提取道路的研究很多，Wang Xia^[27]采用K-Means聚类方法对卫星图像进行分类，得到关于道路区域的二值图像；之后通过基于拓扑细化的形态学方法，对二值化图像进行处理，得到了道路骨架。汪夕明^[28]采用模糊C均值（Fuzzy C-Means, FCM）聚类的方法对卫星影像图二值化，对于图像中的交通流干扰，采用形态学重构和Mean-Shift方法加以去除，对于阴影部分采用HSV（Hue, Saturation, Value）变换加以去除，实现了对有干扰图像的道路提取。魏宇峰^[29]应用SVM（Support Vector Machine）算法对遥感

图像进行分类，并提出一种改进的小波变换算法提取道路，并与K-means算法对比证明其算法的有效性。随着小型航拍无人机的普及，针对无人机的道路提取方法变多。Yucong Lin^[30]提出了一种从无人机航拍图像中快速而鲁棒地提取道路的方法，作者使用梯度直方图检测道路区域，进而使用概率Hough变换和聚类算法提取更精细的道路区域，实验表明该方法可以提取野外沙漠环境中97%的道路区域。Wegner^[31]提出一种新的高阶条件随机场模型用来提取航空图像中的道路，首先提取超像素构成的道路区域，而后使用CRF（Conditioned Random Field）优化割结果，实验证明该方法可以更好地保留道路的拓扑结构，更好地区分道路与非道路像素。Shenlong Wang^[32]针对半自动地图构建以及未来UGV更加依赖地图信息的趋势，提出以OpenStreetMap数据为输入，采用深度学习方法，检测并标记地图中车道、人行路、停车位等各种信息，精炼地图；针对航空图像与车载传感器输出图像的特点，融合二者提取的道路区域，相对于GPS+IMU系统，这种融合道路区域的方法有更好的精度。Shenlong Wang^[1]提出使用航空图像道路网络改进更新开源地图的方法，采用马尔科夫随机场模型对道路中线与道路宽度建模，对OSM中的图片进行道路提取，据此可以纠正OSM道路图层的错误；作者也通过结构SVM方法训练OSM数据集，得到人行道、绿化区域的模型用于提取测试集的道路相关区域。图1.4展示了从OSM中提取道路的结果。



图1.4 基于OSM的道路提取结果

遥感图像提供了对地理空间更全的覆盖区域，但是由于分辨率较低，提取道路难度较大；随着航空飞行器的普及，使用小型低空飞行器获取地面影像，并从中提取道路区域更加灵活方便。从以上研究现状分析，道路提取的方法虽各不相同，但是都利用道路特点——光谱特征、几何特征等。首先提取初始道路区域，而后根据道路细长的特点得到道路区域；也有使用部分道路作为训练集，利用深度学习的方法让机器自

已学习道路特征，而后使用该模型提取道路区域。尽管经过多年的研究，道路检测的方法很多，但是提取道路仍然不是件容易的事，大范围自动提取道路仍然是一个有待解决的问题。^[1]

1.3 主要研究内容

近年来三维重建技术被广泛应用于UGV导航、定位与决策中，然而三维重建得到的地图难以直接用于UGV导航，这是因为UGV很难在三维地图中分辨可通行区域以及障碍物等信息。而道路作为引导无人驾驶车辆导航的重要信息，从地图中提取道路变得愈发重要。基于这样的背景，本课题的研究内容主要包括以下几点：

1. 融合高精度定位信息与视觉传感器信息，构建适用于UGV的二维道路网络地图，为UGV全局路径规划提供先验信息。
2. 使用无人机三维重建技术，离线构建高精度三维地理空间地图，为未知环境的UGV导航提供地图信息。
3. 提取二维地图中的道路区域，构建道路拓扑网络，依托GIS软件平台为UGV导航规划提供依据。

1.3.1 二维与三维地图构建

二维地图构建

二维图像由于操作简单，存储方便等原因被众多UGV厂商采用，本文为了获取视野更大的二维图像选取全景相机，并将其架设在UGV顶部以得到UGV周围环境的全景图。全景相机在球面坐标系中成像，成像后的车道线扭曲严重，所以本文将全景图向下投影到地面，使车道线之间保持平行，得到由全景视频变换后的俯视视角的视频流。通过高精度定位系统，将每帧视频流对应的车辆定位坐标信息编码为二维码放置于每帧视频的右下角，如此设计一个地图采集平台。采集的视频流中每帧图像对应的二维码信息解算为位置、航向，而后根据位置航向信息将图像旋转平移后拼接成完整的路网地图。

以拼接的路网地图为底图，通过自动或半自动方式构建道路的拓扑网络，拓扑网络由点、线以及道路属性（车道数量、限速、是否路口等信息）构成，为UGV导航决策提供先验信息。

三维地图构建

不同于二维地图，三维地图由于包含的信息丰富，在车辆仿真与真实实验中应用广泛，本文构建三维地图的方法是使用无人机搭载的单目摄像机拍摄地理空间的二维图像，将一系列无序的二维图像作为输入，重建地理空间三维场景。首先提取图像特征点，将二维图像矩阵转换为一维特征点向量，而后匹配特征点，将无序图像通过匹配点关联，使用多视图几何相关算法恢复匹配点的三维坐标和相机位姿，最后采用光束平差法优化稀疏点云与相机位姿。采用Multi-View Stereo(MVS) 算法计算每幅图像的深度图，融合深度图得到完整的稠密点云。

1.3.2 二维图像中的道路提取

道路检测对无人驾驶至关重要，本文采用最小二乘法拟合测试集道路区域的光谱特征，从而得到初始的道路区域，用二值化的图片表示，但是二值图存在非道路区域的错误检测，本文首先采用开闭运算平滑二值图，而后采用矩形检测等方法移除开闭运算无法消除的大面积非道路区域，至此可以得到较为理想的道路二值图。在此基础上，通过拓扑细化及短枝丫剔除的方法得到单像素构成的道路拓扑图片，使用GIS软件可以直接生成拓扑路网，用于UGV导航规划。

1.4 本章小结

本章概述了课题研究背景与意义，针对无人驾驶导航与规划高度依赖地图的现状，构建适用于UGV自主导航地图变得十分关键。针对这一问题，本文通过查阅当前地图构建的研究现状，设计了适用于UGV的二维地图与三维地图构建方法。同时由于道路信息在无人驾驶导航规划中有着重要意义，提出从二维地图中提取道路网络，构建道路拓扑，为UGV全局路径规划提供先验信息。本文主要研究内容的流程图表示为图 1.5。

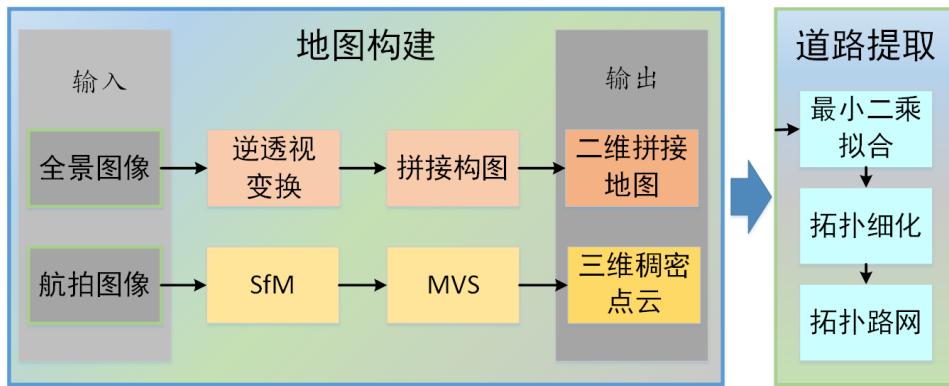


图 1.5 研究内容

第2章 基于全景图像的高精度地图构建

2.1 引言

全景图像（Panorama）是指水平角度包含完整 360° 的相机得到的二维平面图像。相对于普通单目相机，全景相机可以更完整地呈现无人车周围环境。本章通过全景相机与高精度定位系统的数据融合提出一种车道级别电子地图的构建方法，以该地图为基础，结合运动规划技术和跟踪控制技术可以为UGV在结构化或非结构化道路环境下自主行驶提供保障。本章主要包括数据采集系统设计、全景图像处理及大范围电子地图构建。

2.2 传感器数据采集

2.2.1 传感器选取

在开始研究之前，先讨论本研究所涉及到的传感器选型问题。如图2.1所示是UGV通常使用的视觉传感器、3D激光雷达，图(a)是双目相机，双目相机可以通过左右摄像头计算得到场景深度图，但双目相机的基线较短，当物体距相机较远时，计算得到的物体深度图误差较大。图(b)是全景相机，可以获取周围 360° 场景，视野开阔，但相机模型较复杂。图(c)激光雷达可以直接得到3D点云，且精度高，但激光雷达价格昂贵限制了其广泛应用。图(d)是最常见的单目相机，相机的成像可以近似抽象为小孔成像模型，处理其成像较全景相机更方便，无法直接得到景深图，但单目相机尺度未知问题可以通过算法解决。

针对以上分析，结合本文的实际使用需要，本文设计的构建二维地图方法旨在为UGV导航提供先验信息，UGV通过定位信息匹配到二维地图的某区域后，UGV即可通过地图获取当前车道、限速、甚至距离路口远近以及是否有红绿灯等信息，这些先验信息将为UGV导航规划提供重要帮助。三维数据存储、运算等耗费资源，所以在二维地图构建中倾向于选择视野开阔的全景相机。

Ladybug全景相机具有6个独立的摄像头，如图2.1中(b)所示，可以在球形坐标系下将6个相机图像实时合并为一张全景图，呈现在二维平面空间中。Ladybug相机提供 360° 视频串流功能，可以覆盖90%的可视球面，具有图像采集、处理和校正功能。



图 2.1 传感器示例

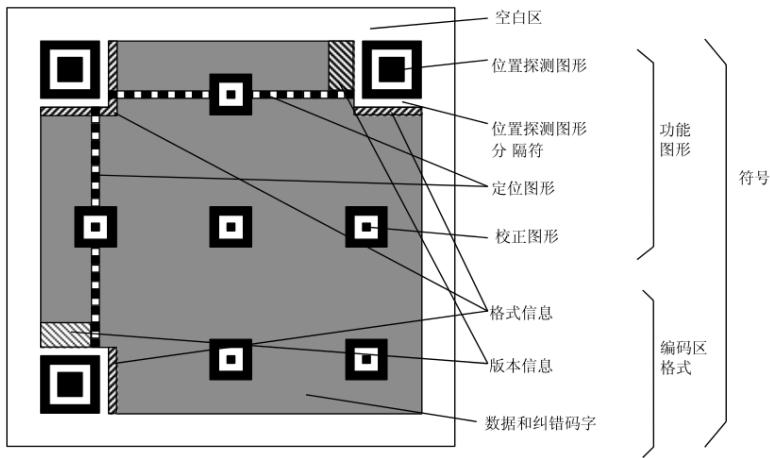
由于本章提出的方法是基于定位信息将变换后的全景图像拼接为大范围地图，所以在此选用高精度组合定位系统，其由差分GNSS（Global Navigation Satellite System）接收机与高精度惯性导航系统构成。在GNSS接收机搜星状态良好时，该组合定位系统可以达到厘米级别精度。

2.2.2 定位信息编码

为了同时采集Ladybug与高精度组合定位系统的数据信息，本文采用将车辆的定位信息编码为大小一定的QR code（Quick-Response code），放置于每帧全景图像左上角位置，完成系统的信息采集任务。

QR code作为一种非常流行的矩阵式二维码，具有空间利用率高，存储数据量大，解码速度快，可以包含字符、数字等不同内容等优点。如图 ?? 所示，二维码可分为两部分：功能区和编码区。功能区的二维码主要是用来定位二维码的位置，校正二维码的形变；编码区的二维码包含该二维码的数据与校验纠错等信息。按照QR code的规则，可以很方便地将定位信息编码为固定像素大小的二维码，进而将其放置在每帧全景图像的左上角，完成信息的采集过程。当回放该视频时，可以很容易地对大小固定的编码区进行解码，读取到每帧全景图对应的车辆当前的位置与姿态信息等，为图

像拼接做准备。



在此介绍一下二维码的编码与解码过程。由于Ladybug图像的帧率为7Hz，高精度组合定位系统的帧率为20Hz，考虑拼接图像的精度，在没有使用硬件触发的条件下，本文采用最近邻原则，即当接受到一帧Ladybug图像时，编码距离当前时刻最近的定位信息。由于编码的信息有时间、经纬度、方位角、偏航角与俯仰角6个整数，所以需要的编码信息量很小，本文采用 25×25 像素的二维码编码定位信息。

2.3 全景图像处理

在得到Ladybug相机的全景图后，使用逆透视投影（Inverse Perspective Mapping, IPM）将全景图像投影成俯视图。而后将车辆的高精度定位信息编码为二维码，放置于对应的逆透视投影得到的图片的左下角，从而完成图像与其对应的位置采集与处理，方便后续构建大范围地图。由于Ladybug成像描述在球面坐标系中，IPM投影需要表示在车体坐标系中，地图拼接需要在世界坐标系中完成，在此简单介绍全景图像处理过程涉及的相关坐标系的变换关系。如图 2.2所示，代表Ladybug全景相机的球面坐标系（图中c表示）与车体坐标系（图中w表示）的关系，其中在车体坐标系中，绕自身x, y和z旋转的角度分别为俯仰角，横滚角和方位角，图中道路代表车辆行驶方向；在全景球面坐标系中，球面狭缝与全景图分块成对应关系（图中绿色区域所示），如图中虚线箭头所示，将球面坐标展开成二维平面得到全景图像，其长宽分别代表相对于车体的方位角 μ 与俯仰角 v 。

为了得到全景图像的IPM俯视图，需要标定全景相机Ladybug相对于车辆的外参：俯仰角 θ ，横滚角 ϕ 和方位角 φ ，以及Ladybug相机光心与地面的高度 h 。现定义车体

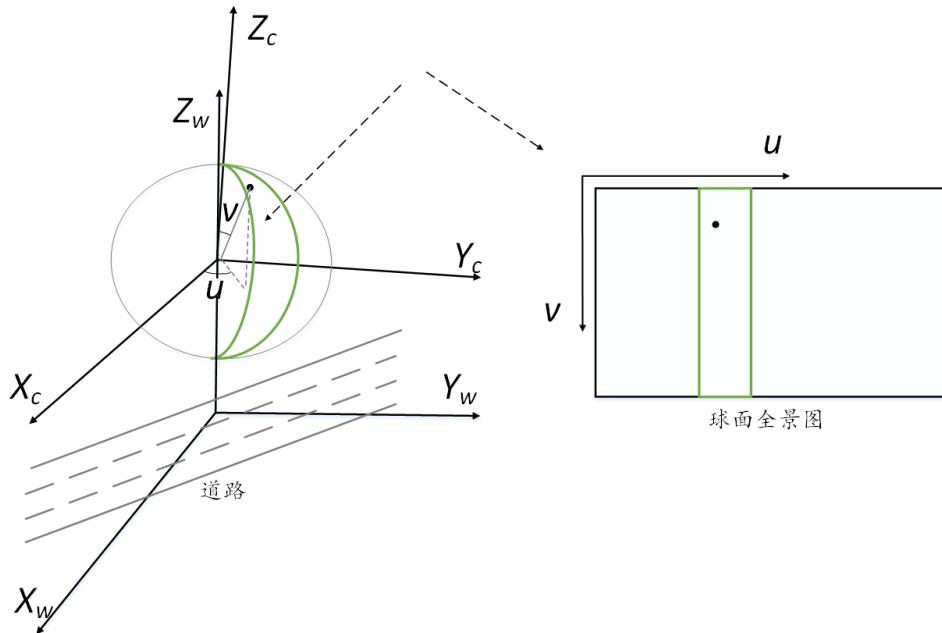


图 2.2 逆透视坐标变换关系

坐标系为 $\{F_\omega\} = \{X_\omega, Y_\omega, Z_\omega\}$, 坐标原点位于车辆后轴中点; 定义全景相机坐标系为 $\{F_c\} = \{X_c, Y_c, Z_c\}$; 定义全景图像坐标为 $\{F_i\} = \{\mu, \nu\}$, 则车体坐标系中任一点 P_c 与全景相机坐标系中点 P_w 的对应关系为:

$$P_c = R_\phi R_\theta R_\varphi^T (P_\omega + T) \quad (2.1)$$

其中

$$R_\phi = \begin{bmatrix} \cos\phi & 0 & -\sin\phi \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\phi & 0 & \cos\phi \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

$$R_\theta = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta & \sin\theta \\ 0 & -\sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

$$R_\varphi = \begin{bmatrix} \cos(\varphi - \frac{\pi}{2}) & \sin(\varphi - \frac{\pi}{2}) & 0 \\ -\sin(\varphi - \frac{\pi}{2}) & \cos(\varphi - \frac{\pi}{2}) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

$$T = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -h \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

进而可以得到全景图像坐标系中的坐标 $P_i = [\mu_i, \nu_i]^T$:

$$P_i = \begin{bmatrix} \arctan \frac{y_c}{x_c} \\ \arccos \frac{z_c}{\|P_c\|} \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

其中 $\|P_c\| = \sqrt{x_c^2 + y_c^2 + z_c^2}$, 即 P_c 的二范数。通过以上算法可以将全景图像（图 2.3）变换得到车体坐标系下的IPM图，显示效果如图 2.4所示，图中长宽在真实地理空间中均为30m。



图 2.3 基于球面坐标的全景图

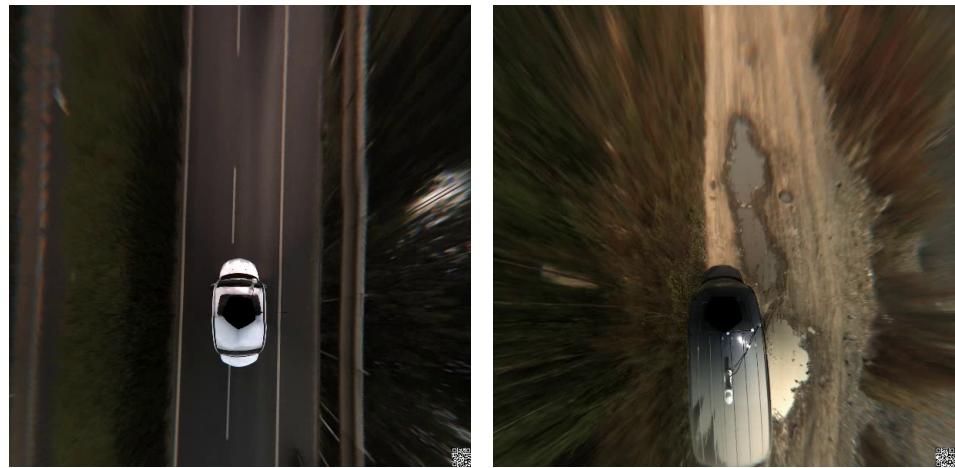


图 2.4 逆透视变换结果

2.4 地图的构建与使用

使用以上方法可以得到全景图像的逆透视投影图，以及每张投影图对应的此时车辆位置与方位等信息。基于此可以将局部小区域的逆透视投影图按照其对应的位置拼接为大范围地图，并添加车道、限速等信息，生成UGV行驶地图，为UGV规划与感知提供先验信息。

2.4.1 图像拼接

图像拼接的历史可以追溯到上个世纪，拼接方法总体上可以分为两类，一类是基于图像特征匹配的拼接方法，另一类是基于图片间相对位置关系的拼接方法。由于采用高精度组合定位系统，在无遮挡、多路径效应较弱的空旷场地，实验精度达到 $5cm$ 以内，所以本文采用基于图片间相对位置关系的方法。具体就是将视频流中每帧逆透视投影图片按照二维码解算的航向旋转一定角度，再按照解算的位置进行平移，对所有视频按照上述方法处理，最终得到完整的城区地图。

对于每帧IPM俯视图，车身为无效信息且占据图像大量位置，对地图拼接造成干扰，所以在拼接地图前，需要将车身移除。由于全景图变换为IPM投影图时，将IPM俯视图变换到车体坐标系中，所以任何一张IPM俯视图的车辆位置与方位是固定的：车辆后轴中心位于图片横轴的中心，纵轴靠下的 $1/3$ 位置处，航向朝上。如图2.5所示。据此设计一个掩码（Mask），在拼接过程中将车辆去掉，只拼接剩下的像素不为零的部分。

在拼接过程中，因为所需拼接的地理空间过大，图片过多，而内存限制了单张图片的大小，所以本文设计了区号标记的方法。具体做法为：将视频流中图片按照位置和航向拼接为多张 28000×7000 像素的图片（图2.5中橙色方框），由于每个像素代表实际地理空间的大小为 $0.06m$ ，即每张拼接后的图片代表的物理空间大小为 $1680m \times 420m$ 。设置整个地图的坐标原点（图2.5红色圆点所示）为某一固定经纬度坐标，IPM图对应的经纬度与该点对比后，计算出该帧IPM图应该放置于哪个区，而后可以拼接成多张橙色大小的图片。一个橙色方框代表一个区域，对应一个区号，相邻区号代表的区域存在大小一定的重叠区域。这是因为每帧IPM图大小一定，而定位信息表示Ladybug的光心位置，即每张IPM图的左右 $1/2$ ，上下 $1/3$ 位置处，在图2.5右下黑色方框中虚线交点位置，如果区号划分的区域（图2.5左下和右下两图的橙色方框）间不存在重叠区域，则某些定位信息虽然属于某个橙色区域，但其对应

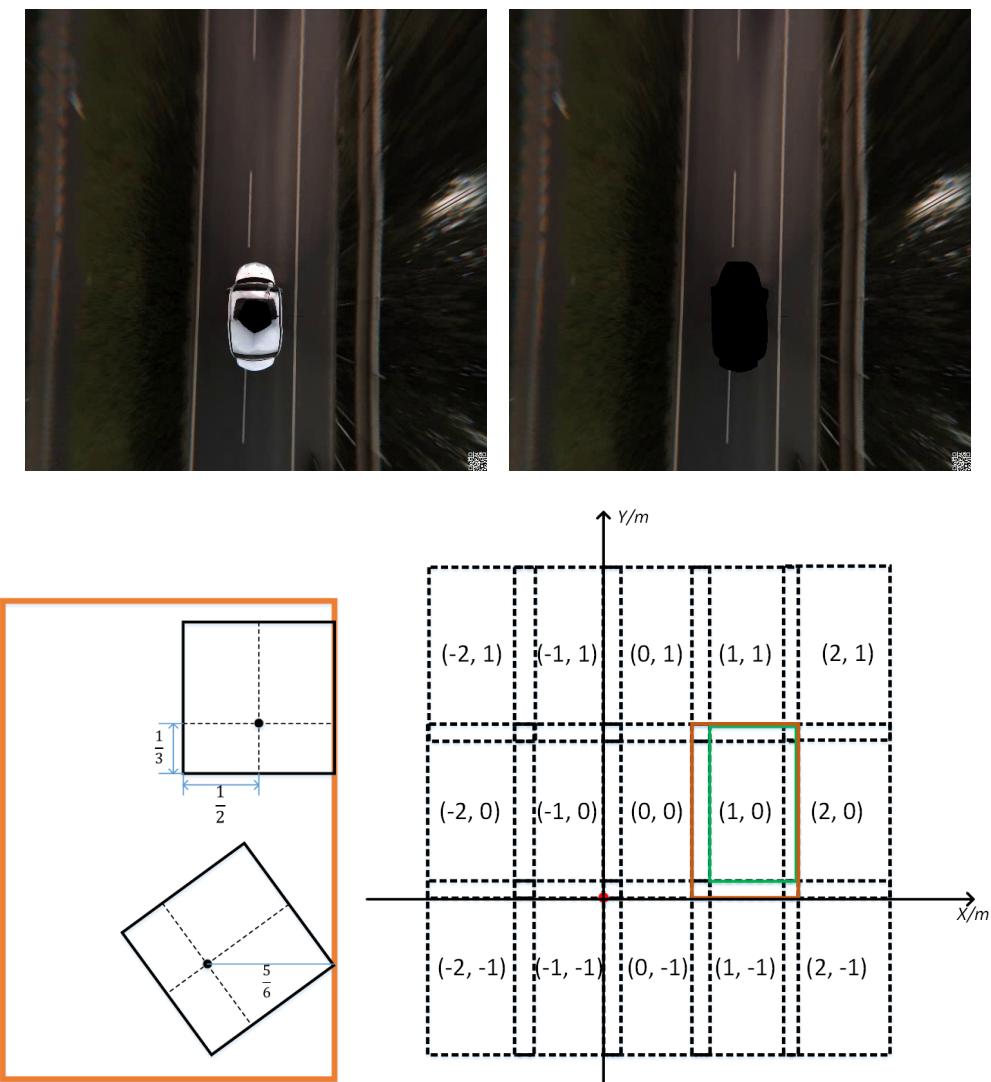


图 2.5 IPM 图拼接处理过程

的IPM图的某些像素可能落在该橙色区域之外，导致无法拼接到橙色区域中。这种存在重叠区域的区域划分方法有效地解决了图像拼接过程中边缘缺失的问题，重叠区域的大小至少为IPM边长的 $5/6$ ，如图 2.5左下黑色方框所示。最后只需要保留上图 2.5的绿色框表示的区域和该区域的区号，这样就可以按照区号将拼接的图片在Photoshop中拼接为更大的图片，为后续GIS数据库中构建地图数据库的底图做准备。

2.4.2 基于GIS数据库生成无人驾驶车辆行驶地图

在得到数张Photoshop拼接的更大的图片后，按照上图 2.5的分区原则可以得到每张图片四个顶点的地理坐标。依托SuperMap(GIS)软件完成拼接地图的金字塔图生成，作为GIS数据库的一个图层。这样构建的地图并不能直接用于UGV导航或规划，我们将得到的底图作为GIS数据库的一个图层，根据底图可以得到车道级别的道路拓扑结构，该拓扑作为GIS数据库的另一个图层，在线段与线段的节点上添加各种属性，例如车道数量，限速，红路灯和路口等，即可实现全局路径规划等功能。图 2.6中左图为拼接的路口图片，右图中绿色线段为GIS数据库的道路拓扑。

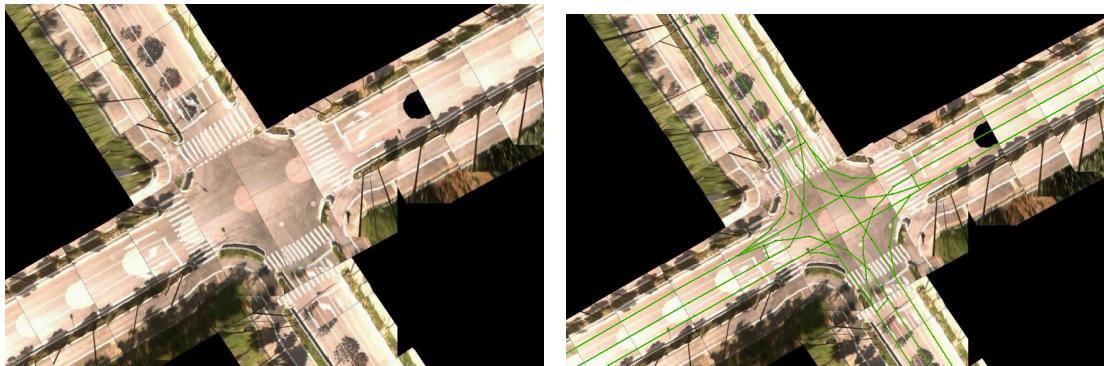


图 2.6 拼接路口在GIS数据库显示结果

2.5 本章小结

鉴于高精度地图在UGV自主导航与决策规划中的重要作用，本章提出了一种新的高精度地图构建方法，并给出了地图构建的实现流程。在该方法中，高精度组合导航系统的位置航向输出编码为固定大小的二维码，嵌入全景图像视频中，这样保证了全景图像与定位信息同步，完成系统数据的采集工作。而后在离线拼接地图过程中，将全景图像转换到车体坐标系中，完成IPM过程，并将每个IPM图像通过车辆的高精

度定位信息，旋转、平移拼接为范围较大的地图。但由于地理空间广阔，计算机内存限制等原因，本章采用将采集的视频拼接为多个大小一致的图像，并对这些图像编号，以方便后序的手工拼接与导入GIS数据库生成完整的道路地图。最后将地图生成GIS数据库的图层，完成道路拓扑构建与道路属性添加的任务，第5章实验环节展示了本章提出的方法在实际无人驾驶比赛的效果，验证本章提出的方法有效性。但是本章获取的二维地图存在肉眼可见变形、包含地面信息较少的问题，所以下文将介绍另外一种构建地图方法，可以通过二维图片恢复地理空间的三维结构。

第3章 基于无人机航拍图像的三维地图构建

3.1 引言

大部分UGV依赖环境地图导航与感知^[1]，这限制了UGV在未知环境自主导航规划。为了解决该问题，当前许多技术利用车载传感器构建大范围地图，例如SLAM和第二章提到的用车载Ladybug构建地图的方法。然而车载传感器仅能获取车辆周边环境信息且易被阻挡，而且在野外或灾害地区等环境中，车辆可通行区域变少。然而无人机拥有比UGV更广阔的视野，不受地面障碍物的影响，可以灵活地从空中俯瞰地面。本章介绍了应用无人机构建三维环境地图的方法，为UGV自主导航提供先验信息。

三维重建涉及到的内容可以分为两部分：稀疏点云的获取与点云稠密化。其中稀疏点云的获取使用的是Structure from Motion，在技术上与当前热门的Visual-SLAM（V-SLAM）比较类似，只是SfM侧重于三维重建，而SLAM侧重于实时定位，并预测下一时刻的位置。SfM可以分为视觉前端与优化后端，前端涉及相机模型，坐标转换，特征提取与匹配以及多视图几何等相关内容，最后得到粗略的相机位姿与3D点坐标，后端涉及优化前端得到的相机位姿与3D点坐标，去除误差大的3D点，精炼相机位姿等。点云稠密使用的技术为Multi-View Stereo（MVS），MVS的实现方式多种多样，本文采用基于深度图融合的方法，对每张图片寻找参考图，而后根据参考图与SfM恢复的相机位姿计算该张图片的深度图，最后融合所有图片的深度图形成稠密点云。

3.2 相机模型

三维地图构建复杂，但可以提供更多的地理空间信息，必将是未来UGV地图发展的方向。由于本文将基于无人机视觉传感器构建三维场景地图，因为无人机飞行高度较高，此时双目相机的基线基本上可以忽略，两个双目相机的输出基本相同，无法解算得到景深图，因此在三维重建中，选择单目相机作为本文的传感器。

使用相机拍摄物体的过程实际是一个光学成像过程，这涉及到摄像机最基本的原件——透镜——的成像原理，如图 3.1 所示，这是最基本的透镜成像原理： Z 是物体距透镜光心的距离，简称物距， f 是焦距， b 是相距，即成像平面与透镜光心的距离，

三者满足等式 3.1。

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{Z} + \frac{1}{b} \quad (3.1)$$

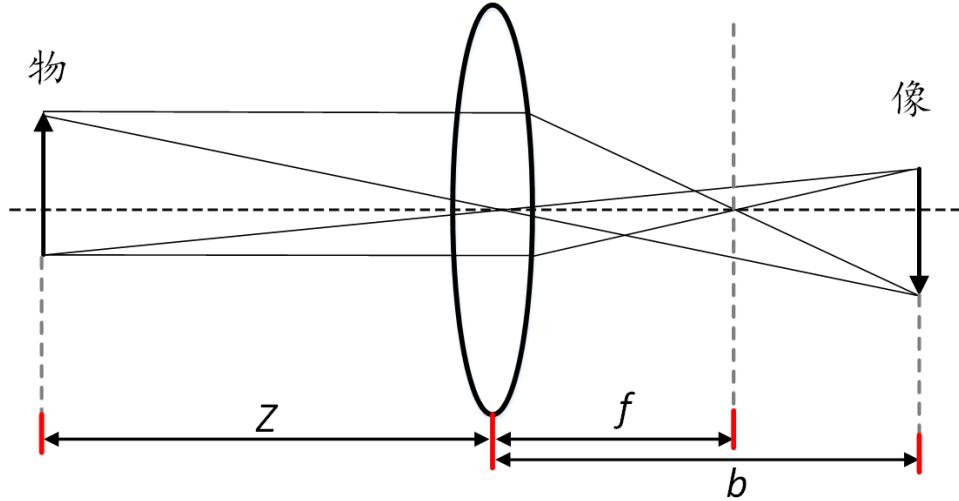


图 3.1 透镜成像原理

在机器视觉中，利用摄像机可以将三维场景记录在二维平面上，不同的相机模型产生不同的成像效果，比如第二章中Ladybug使用的球面成像模型，使多个相机的图像拼接简化为绕球面坐标的光心旋转。但常见的相机模型还是小孔成像模型，如图 3.2所示。数码相机中，镜头近似为一个凸透镜，感光元件位于透镜焦点附近，将焦距近似为凸透镜中心到感光元件的距离时，该模型就变为小孔成像模型。这可以类比为艺术家画一幅画的过程，将眼睛放在图 3.2针孔C（光心）处，在物体与眼睛之间放置一个画布（图 3.2中虚像位置），按照光线直线传播的原则，则物体反射的光线与眼睛的连线交画布一点，如此物体可以在画布上成像。只是相机的成像在光心后面，所以说存在一个虚拟成像平面。

在三维空间中，物体反射的光线经过小孔形成倒立二维图像，根据其数学模型，可以得到

$$-\frac{x}{X} = \frac{f}{Z} \quad (3.2)$$

其中， f 是小孔到成像平面的距离，即焦距； Z 是物体距光心的距离，简称物距； x 是物体在成像平面的投影长度； X 是物体实际长度。为了简化以上模型，用图 3.3表示小孔成像的等价模型，其中 C 是相机中心， $P(X, Y, Z)$ 为空间中的3D点， $p(x, y, 1)$ 表示3D点成像在感光元件上的点，小孔成像近似后，成像平面与相机中心的距离为焦

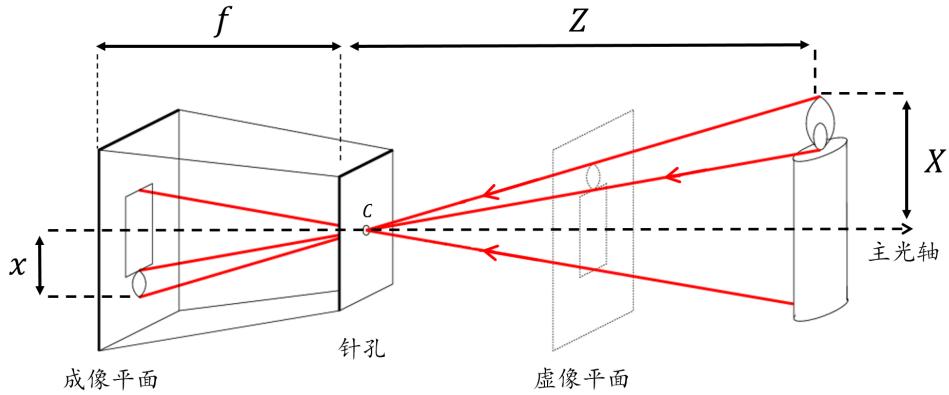


图 3.2 小孔成像模型

距 f 。图 3.3展示了三个坐标系，分别为相机坐标系、图像坐标系与像素坐标系，在下节中详细介绍。

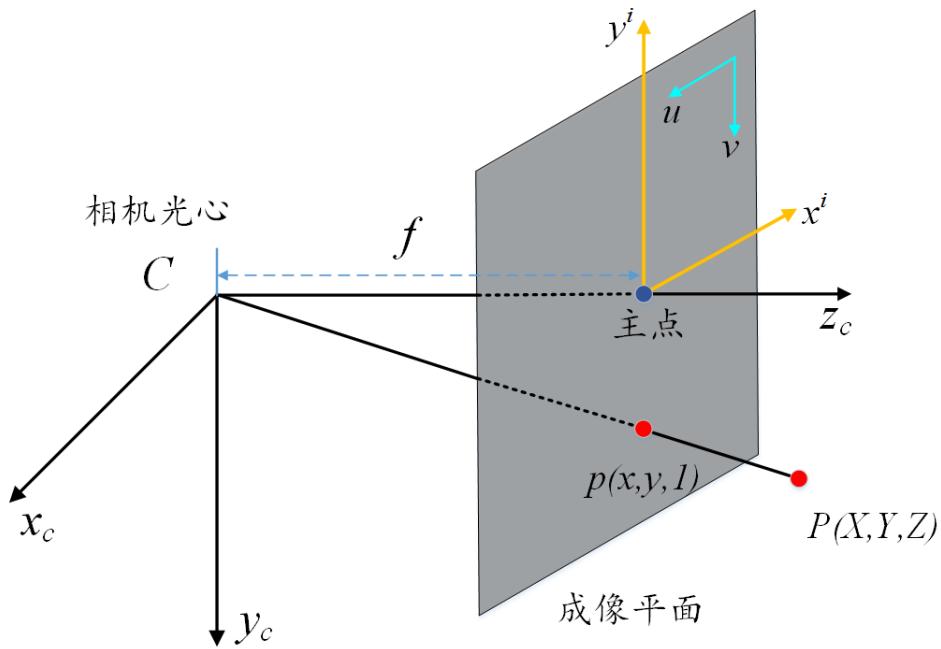


图 3.3 小孔成像等价模型

3.3 相关坐标系

从上一节知道，仅仅相机内部就存在多个坐标系，那么摄像机在空间中涉及的坐标系转换问题将在这节详细探讨。相机成像的过程是一个3D物体显示在2D成像平面的过程，在此涉及物体，真实空间与相机三者的位置关系。物体在真实空间的位置坐

标即是物体在世界坐标系中的坐标表达，物体相对于相机中心的位置坐标是物体在相机坐标系中的坐标表达。这里就存在两个三维坐标的转换，即同一个点在世界坐标系与相机坐标系下表达方式的转换关系，如式3.3^[42]，该变换可以看做三维坐标系的刚体变换。

$${}^cP = {}^cR_w {}^wP + {}^cT_w \quad (3.3)$$

其中 c 表示相机坐标系， w 表示世界坐标系， wP 表示世界坐标系下 P 点3D坐标， cP 是相机坐标系下 P 点3D坐标， cR_w 和 cT_w 分别表示由世界坐标系到相机坐标系的旋转矩阵和平移矩阵。

将世界坐标系下的3D点表示为齐次坐标 $(X, Y, Z, 1)$ ，式3.3可以改写为：

$${}^cP = \begin{bmatrix} {}^cR_w & {}^cT_w \\ 0_{1 \times 3} & 1 \end{bmatrix}_{4 \times 4} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

其中 cR_w 是 3×3 矩阵，三个列向量两两正交； cT_w 是 3×1 矩阵，代表两个坐标系原点连线的向量， cP 坐标表示为 (x_c, y_c, z_c) 。

由上图3.3中可以看到成像平面内的二维坐标系 x_i, y_i ，该二维坐标系称为图像坐标系，可以推导某点在相机坐标系与图像坐标系转换的公式表示为式3.5和式3.6，其中 x_c, y_c, z_c 表示相机坐标系下的坐标。

$$x_i = f \frac{x_c}{z_c} \quad (3.5)$$

$$y_i = f \frac{y_c}{z_c} \quad (3.6)$$

改为矩阵表达形式为

$$\begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

相机在生成图片的过程中，由于成像平面由许多CCD感光元件组成，所以成像

的横纵坐标是不连续的，由此引入像素概念，同时也产生从图像坐标系到像素坐标系的转换关系如式 3.8。

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{s_x} & s & p_x \\ 0 & \frac{1}{s_y} & p_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

其中， s_x 是u轴方向单像素的宽度， s_y 是v轴方向单像素的宽度，当前大部分CCD的像素宽度， $dx = dy$ ，但老式电视机使用的是矩形ccd，导致 $s_x \neq s_y$ 。 p_x 是主点（图 3.3 Z 轴与成像平面的交点）与图像左边界的距离， p_y 是主点与图像上边界的距离。 s 是衡量主光轴与成像平面的倾斜程度，如果主光轴垂直于成像平面，则 $s = 0$ 。这些参数被称作相机内参，一般可以通过查询相机手册得到包括焦距在内的相机内参。

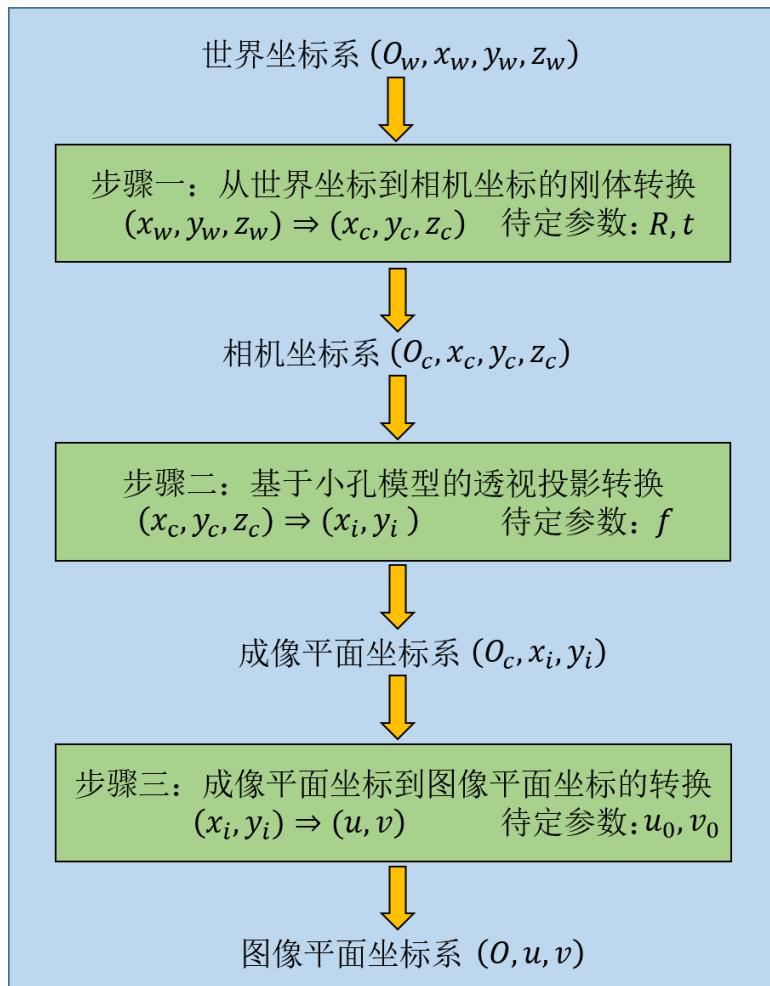


图 3.4 坐标转换流程图

至此我们可以得到从世界坐标系到像素坐标系转换过程，如上图 3.4 和下图 3.5 所

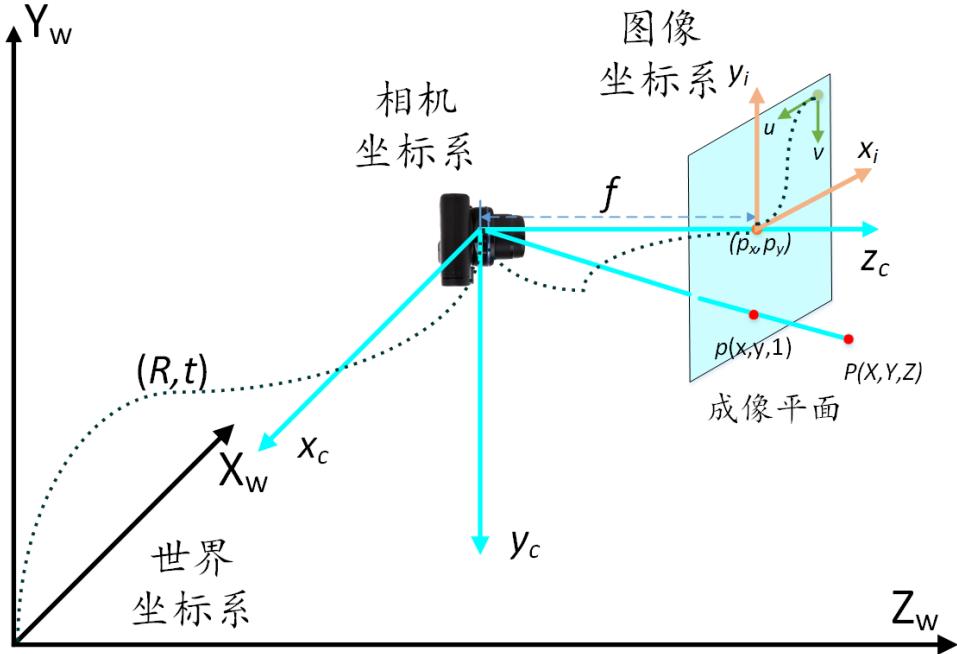


图 3.5 坐标转换关系图

示。上图 3.4 过程用公式表达为式 3.9 所示。

$$z_c \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{s_x} & s & p_x \\ 0 & \frac{1}{s_y} & p_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} {}^c R_w & {}^c T_w \\ 0_{1 \times 3} & 1 \end{bmatrix}_{4 \times 4} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

至此我们得到相机成像过程某点在不同坐标系下转换关系，将在真实空间表达的3D物体成像为相机CCD上的2D图像，完成摄像过程。式 3.9 涉及坐标系变换的相关参数: ${}^c R_w, {}^c T_w$ ，这些参数称为相机的外参，其与相机的空间位置有关，与相机本身无关；而其他参数，如 f, p_x, p_y, s_x, s_y 称为相机内参，这些参数与相机的空间位置无关，只与相机本身有关。实际上在相机成像过程涉及的相机内参除了这些参数，我们还会遇到无法线性建模的相机内参，如Gopro 相机的鱼眼镜头中，我们可以看到世界中的直线不再是直线，如图 3.6 左图所示，这些弯曲的直线有一些共同特性：它们都是关于中心扭曲的，我们称这种畸变为径向畸变，这意味着像素点是沿着从中心放射的径向成比例扭曲的。

为了去除相机的畸变到图 3.6 右图所示图像，需要对畸变进行建模，表示为多

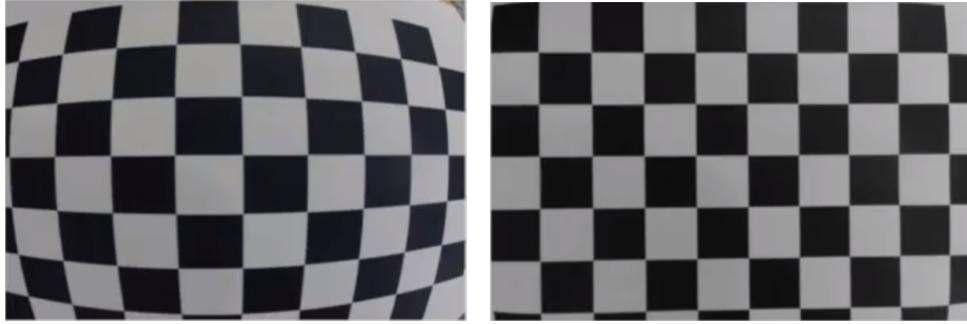


图 3.6 径向畸变的校正

项式 3.10。

$$\begin{cases} u^{rad-dist} = u(1 + k_1 r + k_2 r^2 + k_3 r^3 + \dots) \\ v^{rad-dist} = v(1 + k_1 r + k_2 r^2 + k_3 r^3 + \dots) \\ r^2 = u^2 + v^2 \end{cases} \quad (3.10)$$

其中， k_1, k_2, k_3 是未知参数，需要标定才可以得到，而实际校正径向畸变一般也只用到2个或3个参数，如图 3.6所示，左图为存在径向畸变的图片，右图为经过校正后的图片。

在相机校正的过程中，实际上还需要校正图像的切向失真，这是由于摄像机安装时成像平面与透镜没有平行导致的，如果说径向畸变是坐标点距离中心点的长度发生变化，那么切向畸变就是坐标点与中心点的水平夹角发生变化。对切向畸变的建模如式 3.11，一般使用 p_1, p_2 两个参数。

$$\begin{cases} u^{tag-dist} = u + 2p_1uv + p_2(r^2 + 2u^2) \\ v^{tag-dist} = v + 2p_2uv + p_1(r^2 + 2v^2) \\ r^2 = u^2 + v^2 \end{cases} \quad (3.11)$$

综上所述，本节详细介绍了相机模型与相机相关坐标系转换关系，以及相机成像的校正等相关内容，这部分属于图像处理的基础，该部分内容是为下文多视图几何作铺垫。以下3.4 - 3.7节是本文SfM的主要内容，可以概括为流程图 3.7，输入为无序单目航拍图像，输出为稀疏点云与相机位姿，以下将分步介绍各个环节。

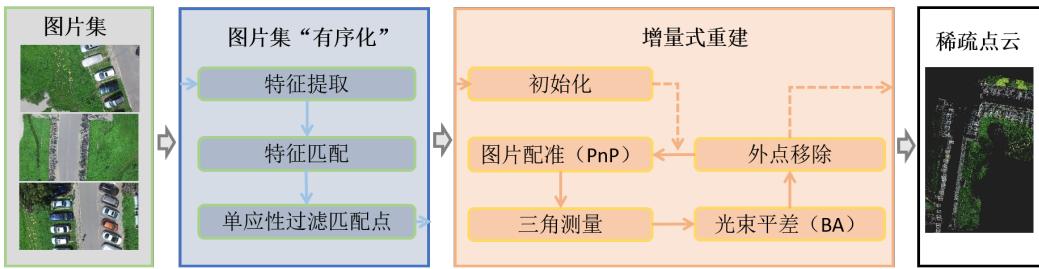


图 3.7 SfM 流程图

3.4 特征点提取

SfM首先需要找到图片集中每两张图片间的几何关系，这样才能使无序图片集“有序化”，从而估算相机间的运动与成像的三维点坐标。为了找到图片之间的几何关系，现今有许多方法，例如光流法，特征点法等，光流法适用于匀速运动的视频流中，要求帧间运动比较小，从而找出帧间运动关系；特征点法指对图像特征的提取与存储，是图像中比较有代表性的特征。由于本文使用的数据集为无序的航拍图像，特征点法较为适宜使用。特征点提取更通俗的理解为将二维矩阵描述的图像降维为一维特征描述的图像，突出图像的重点，去除冗余信息的过程。

最简单的图像特征为图像的角点，角点就是图像中线的交点，例如大厦最高处的顶点。两幅图像的角点不会随着图像移动而改变，但是角点会随着离相机的距离太近而变得无法识别，所以许多研究者设计了精巧而互有优劣的特征检测与描述方法，比较著名的有SIFT^[33]，SURF^[34]，ORB^[35]等。相对于简单的角点，这些特征检测具有以下优点^[36]：

- 可重复，即相同的特征可以在不同的图片中找到。
- 可区别，即不同的特征有不同的表示。
- 高效率，即特征点数远远小于像素数。

实际上，特征点可以分为局部特征点和全局特征点，像上面举例的三个特征点实际上是局部特征点，局部特征点顾名思义就是基于图像的突出区域明显的区分图像的特征，一般而言，局部特征需要具有旋转不变性，对光线强度变化的鲁棒性等，使用局部特征检测算法可以从图像中提取一系列称为感兴趣区域的特征，由一系列向量组成。相反全局特征是将图像表示为一个向量，向量的值反映图像特定属性，可以是颜色、纹理或形状等不同特征。当区分图像是海洋还是森林时，使用全局颜色描述子可以很好地将图像归类。二者的区别如图 3.8 所示。

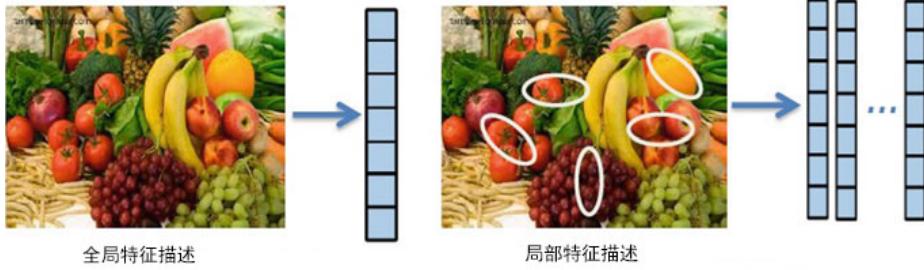


图 3.8 全局特征与局部特征描述

选用哪种特征描述子取决于图像处理的情景。由于地理空间的航拍图像在颜色或者纹理等全局特征方面相似度极高，不易辨识，难以找到图片之间的匹配关系，所以本文选用局部特征描述子：SIFT。

特征点提取包括特征点检测与特征点描述两部分，在此以本文使用的SIFT特征点为例，简单介绍一下检测子与描述子的使用方法。检测子有很多，使用较多的有Harris Detector^[38]，FAST Detector^[37]。Harris检测子结合边缘与角点检测方法得到图像不同方向的自相关系数变化率，例如强度变化率，该方法将局部特征描述为对称的自相关系数矩阵。Fast检测子考虑某像素周围一定大小的圆，圆上像素强度与该像素比较，如果大于或小于某一阈值则定义该像素为角点，这两种检测子对尺度变化不具有不变性，不适合应用于拍摄高度不同的航拍图形的特征检测中。而SIFT作为一种具有尺度、放缩不变，对光线明暗鲁棒的特定，很适合应用于环境复杂的航拍图形的特征特取与描述中。SIFT算法由四个步骤组成：尺度空间极值检测，兴趣点（关键点）定位，方向计算以及兴趣点描述。第一个阶段是使用DoG (Difference of Gaussian) 算子与图像做卷积确认潜在的兴趣点，这里使用DoG算子代替LoG (Laplacian of Gaussian) 算子以提高计算速度。

LoG是二阶导数的线性组合，也是用来检测斑点(Blob)的检测子，给出一张图片 $I(x,y)$ ，则尺度空间 $L(x,y,\sigma)$ 是由图片 $I(x,y)$ 与不同大小的高斯核 $G(x,y,\sigma)$ 卷积得到的，表示为

$$L(x,y,\sigma) = G(x,y,\sigma) * I(x,y) \quad (3.12)$$

其中，

$$G(x,y,\sigma) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{(x^2+y^2)}{2\sigma^2}} \quad (3.13)$$

据此可计算Laplacian算子为

$$\nabla^2 L(x, y, \sigma) = L_{xx}(x, y, \sigma) + L_{yy}(x, y, \sigma) \quad (3.14)$$

上式对大小为 $\sqrt{2\sigma}$ 的斑点有最强的响应，然而该算子严重依赖图像中斑点大小与用来平滑图像的高斯核大小，即大小不同的高斯核函数与大小相近的斑点卷积有最强的响应。为了在一幅图像中自动检测不同大小的斑点，多尺度的方法应用而生^[39]，通过尺度不同的归一化Laplacian算子对图片进行平滑从而在不同尺度空间找到大小不同的斑点，尺度归一化的高斯核函数为式 3.15。

$$\nabla^2_{norm} L(x, y, \sigma) = \sigma^2 (L_{xx}(x, y, \sigma) + L_{yy}(x, y, \sigma)) \quad (3.15)$$

σ 较大时对应图片的粗略特征，较小时对应图片的精细特征。同时LoG算子是对称的，所以斑点旋转对检测没有影响，但是LoG算子耗费计算资源，为了加速计算并在尺度空间检测到稳定的兴趣点，Lowe^[33]提出了高斯差分尺度空间，简称DoG Scale-Space。如式 3.16所示，利用不同尺度的高斯差分核函数与图像卷积生成。

$$\begin{aligned} D(x, y, \sigma) &= (G(x, y, k\sigma) - G(x, y, \sigma)) * I(x, y) \\ &= L(x, y, k\sigma) - L(x, y, \sigma) \end{aligned} \quad (3.16)$$

计算DoG的关键步骤是构建图像金字塔：对于某个图像，使用大小不同的高斯核与该图像卷积，可以得到图像模糊程度不同但大小一致的图像，这些图像构成了一个八度(Octave)，而后对这一系列图像进行降采样，降采样就是对Octave中的图像隔行隔列采集像素，最后图像尺度(Scale)变为原来大小的1/4，构成下一个Octave。这样就避免了对不同尺度空间下的图像进行卷积，减少计算增加效率。为了寻找尺度空间的极值点，在DoG尺度空间中，每个采样点要与其周围所有相邻点（8邻域中，一个像素点周围共有26个像素点）比较，若该点是极大值或者极小值则定位为兴趣点。整个过程可以用图 3.9描述。

检测到特征点后，需要定量的表示各个特征点的强度、方向等特征，为特征点匹配做准备。Lowe提出用一个128维度的向量表示每个特征点，首先对每个关键点周围的 16×16 邻域内所有像素计算其梯度的幅值与方向，用直方图统计邻域像素的梯度方向，梯度直方图将 $0 - 360^\circ$ 分为8个区间，对得到的直方图进行高斯平滑，以减少

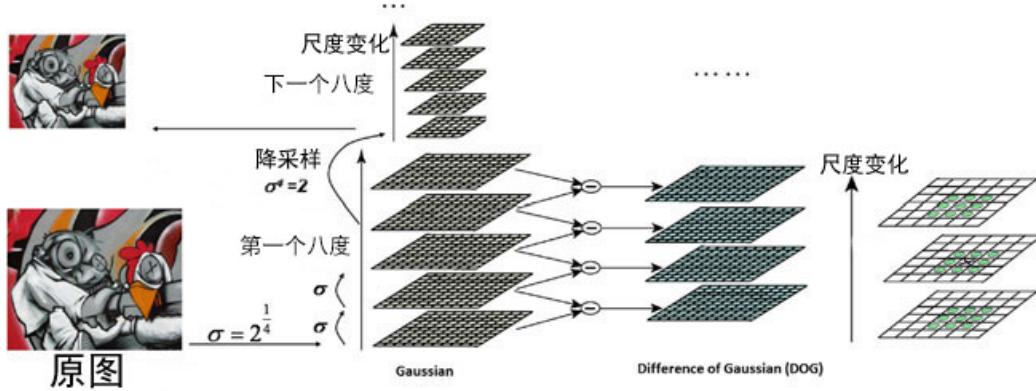


图 3.9 图像金字塔的构建

突变带来的影响。选取直方图的峰值作为该关键点处邻域梯度的主方向。所以在每个 4×4 的象限内，将每个像素的主方向加权到直方图的8个方向区间中的一个，计算一个梯度方向直方图，这样对于每个特征点可以形成 $4 \times 4 \times 8 = 128$ 维的描述子，计算描述子的过程如图 3.10。

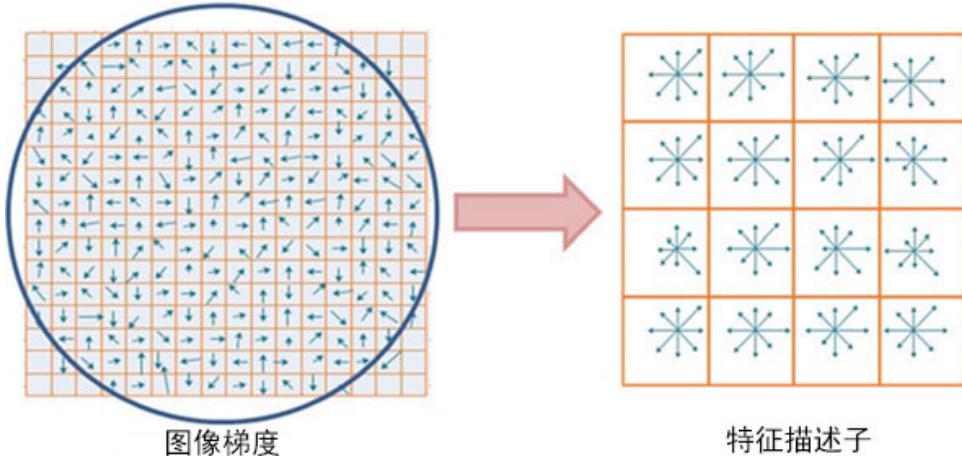


图 3.10 SIFT描述子的构建

至此本节详细介绍了SIFT特征的提取与描述方法，图 3.11是使用SIFT特征点检测多张图像的结果，图中圆圈的大小代表兴趣点（斑点）的大小（size），圆圈半径越大，代表特征点的强度（response）越小，圆圈中的线段代表SIFT特征点的主方向。

3.5 特征点匹配

上面提到本文使用SIFT作为特征点检测与描述的方法，特征点提取并描述后，就需要找出图像间通过特征点联系起来的关系，即每张图像中的特征点如何与其他图像的特征点进行匹配，找到相近的特征点并去除错误匹配的特征点。特征点匹配解决航



图 3.11 SIFT 特征点检测结果

拍图像之间的数据关联问题，将无序的图片数据集建立关联关系，为下文通过图像匹配的特征点计算相机位姿并还原特征点的三维坐标提供基础。一对匹配点是真实空间里同一个点，如果将所有图片对应同一个真实点的特征点连在一起，将使数据集中所有无序图片“有序化”。同样如果匹配点中有大量的错误匹配，将对后续的位姿估计与还原三维结构产生不利影响，所以如何去除错误匹配同样至关重要。下面就这两方面展开讨论。

假设在图片集 $I = \{I_i | i = 1 \dots N_I\}$ 中检测到的局部特征点为 $F_i = \{(x_j, f_j) | j = 1 \dots N_{F_i}\}$ ，其中 x_j 表示特征点位置坐标， f_j 表示特征点描述子，如果是 SIFT 特征点，则 f_j 是一个 128 维向量。对于 F_i 与 F_j 的特征点匹配的方法，最简单的是使用暴力匹配，即 F_i 总每个特征点与 F_j 中特征点测量两个向量之间的距离，需要进行 $N_{F_i} \times N_{F_j}$ 次距离比较。对于像 SIFT 这样的浮点描述子，一般采用欧拉距离作为衡量依据，而对于像 BRIEF (ORB 特征描述子) 二进制描述子，则一般使用汉明距离作为度量依据。

但是当图片长宽较大，分辨率较高时，图片特征点会很多，这时采用暴力匹配会导致效率很低，一般实际使用中采用近似最近邻 (Approximate Nearest Neighbor, ANN) 匹配方法。事实上，无论 SIFT 特征匹配还是数据库检索本质上是相同的，都是使用距离函数在高维矢量空间中寻找相近对象的过程。常用的方法是 K 近邻查询，设置查询点与正整数 K，从另一个数据集中根据距离公式找到距离最近的 K 个数据，如果 K=1，该方法变为最近邻查询算法。K 近邻查询算法是通过构建 KD-Tree 或者 R-Tree 等实现的。

在此简单介绍最常用的最近邻匹配库 FLANN (Fast Library for Approximate Nearest Neighbors)，FLANN 具有一种内部机制，该机制可以根据数据本身选择合适的算法来处理数据集，基于 FLANN 的匹配非常准确、快速。FLANN 在使用的时候

需要配置两个参数：indexParams和searchParams。使用FLANN时，indexParams可以选择为LinearIndex、KTreeIndex、KMeansIndex、CompositeIndex和AutotuneIndex，其中KTreeIndex灵活且可被并行处理。对于searchParams，用来指定索引树被遍历的次数，即check值，该值越大则匹配的时间越长，当然也越准确。

即使最近邻匹配也无法保证所有匹配的特征点都正确，Lowe^[40]在1999提出一种简单的方法可以剔除大部分的错误匹配。对于某个特征点向量，如果查询数据集中与其距离最近的特征点向量与次近的特征点向量距离之比小于0.8，可以避免约90%的错误匹配，但正确匹配也因此变少。使用FLANN并采用Lowe提出的方法可以去掉大部分的错误匹配，图3.12显示760对匹配特征点（最近邻筛选，系数取0.8）以及红点表示的未匹配特征点。

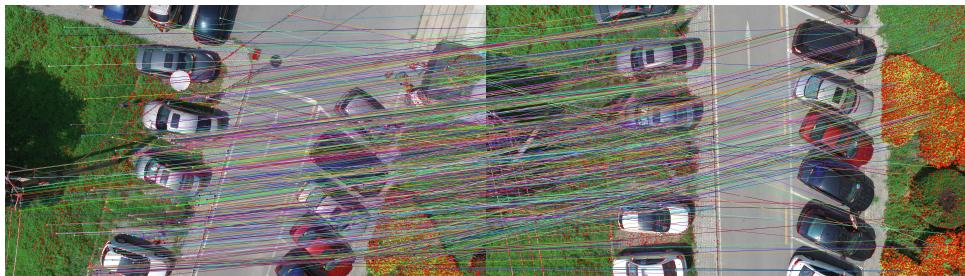


图 3.12 FLANN匹配

从上图可以看出，使用Lowe提出的方法刷选最近邻匹配结果后仍然存在错误匹配点，这是因为刚刚的匹配方法仅基于特征描述子的向量值，没有考虑图片的几何关系，也就无法保证匹配特征点对应相同的场景，因此本文利用投影几何相关知识再次刷选错误的匹配点。不同投影描述图片间不同的几何关系，例如，单应性变换（又称射影变换^[41]）描述相机拍摄的二维图片之间纯旋转和平移变换。对极几何通过本质矩阵（Essential matrix） E 和基本矩阵（Fundamental matrix） F 描述移动相机的关系，并可通过三焦张量扩展到三视图间的关系。无论哪种变换关系，有效的变换可以满足大部分匹配点的几何关系，那么这种变换或者匹配点被认为是有效的。本文在删除错误匹配时，使用了对极约束关系，这将在三维重建的初始化时详细阐述，以下首先介绍一下单应性变换，因为单应性变换不仅可以用来筛选错误匹配点，也可以用来计算两视图纯旋转关系，从而避免使用纯旋转关系的两视图用于三维重建的初始化，造成对极约束永远满足。

单应性又称射影变换、保线变换，与坐标系无关。映射 h 是射影变换的充要条件是：存在一个 3×3 非奇异矩阵 H ，使得任意一个矢量 X 表示的坐标点都满足 $h(x) = Hx$ 。

即

$$\lambda \begin{bmatrix} u_2 \\ v_2 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & h_{13} \\ h_{21} & h_{22} & h_{23} \\ h_{31} & h_{32} & h_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ v_1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3.17)$$

由上式可知，单应性变换表示两个平面的空间位置关系，或两视图纯旋转的位置关系，如图 3.13 所示。

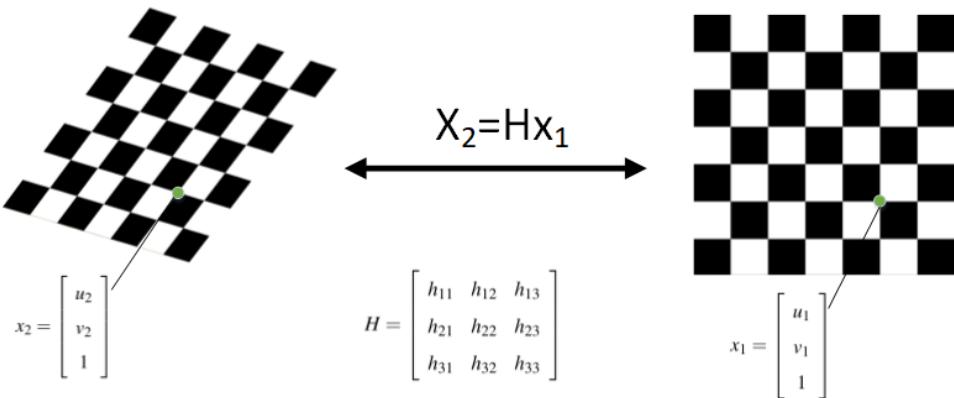


图 3.13 单应性变换

矩阵 H 是一个齐次矩阵，在 H 的九个元素中有八个独立比率，即交比（Cross Ratio） $h_{11} : h_{12} : h_{13} : h_{21} : h_{22} : h_{23} : h_{31} : h_{32} : h_{33}$ 不会因为 H 乘以非零因子而变化，所以单应性变化有八个自由度，而每个二维特征点可提供 2 个方程，故需要解算 H 需要至少 4 对匹配点。已知两个视图四对匹配特征点坐标 x_1, x_2 ，单应性变换表示为 $x_2 = Hx_1$ ，这是齐次矢量方程。三维矢量 x_2 和 Hx_1 不相等，实际可以写为 $\lambda x_2 = Hx_1$ 。单应性变换可以变形为 $x_2 \times Hx_1 = 0$ （矢量与自身外积为零），记为 $[x_2]_\times Hx_1 = 0$ ，其中 $[x_2]_\times$ 表示 3 维矢量 $x_2 = (u_2, v_2, 1)$ 的 3×3 的反对称矩阵，如式 3.18。

$$[a]_\times = \begin{bmatrix} 0 & -a_3 & a_2 \\ a_3 & 0 & -a_1 \\ -a_2 & a_1 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.18)$$

设 h_i 为 H 的第*i*行，计算单应性矩阵的过程可以写成下式 3.19。

$$\begin{aligned}
 & \begin{bmatrix} u_2 \\ v_2 \\ 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} h_1 \\ h_2 \\ h_3 \end{bmatrix} X_1 = \begin{bmatrix} u_2 \\ v_2 \\ 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} h_1 X_1 \\ h_2 X_1 \\ h_3 X_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_2 \\ v_2 \\ 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} X_1^T h_1^T \\ X_1^T h_2^T \\ X_1^T h_3^T \end{bmatrix} \\
 & = \begin{bmatrix} 0 & -1 & v_2 \\ 1 & 0 & -u_2 \\ -v_2 & u_2 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_1^T & 0_{1 \times 3} & 0_{1 \times 3} \\ 0_{1 \times 3} & X_1^T & 0_{1 \times 3} \\ 0_{1 \times 3} & 0_{1 \times 3} & X_1^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h_1^T \\ h_2^T \\ h_3^T \end{bmatrix} \quad (3.19) \\
 & = \begin{bmatrix} 0_{1 \times 3} & -X_1^T & v_2 X_1^T \\ X_1^T & 0_{1 \times 3} & -u_2 X_1^T \\ -v_2 X_1^T & u_2 X_1^T & 0_{1 \times 3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h_1^T \\ h_2^T \\ h_3^T \end{bmatrix} = 0
 \end{aligned}$$

上式简写为 $Ab = 0$ ，其中 A 为 3×9 矩阵， $\text{rank}(A) = 2$ ，这是因为每对匹配点只提供两个量： u 和 v ，也可以从 A 矩阵的值看出，将 A 的第一行乘以 u_2 与第二行乘以 v_2 相加得到第三行。 b 为 9×1 矩阵，由于只需要维持 b 各项的交比不变即可，所以有8个自由度，故需要4对匹配点即可在这个线性系统上获得足够的条件计算得到单应性矩阵 H 的各项。由以上分析我们可以知道当给定的匹配点为4个时，方程有精确解。但是大部分的匹配问题匹配点的数目远不止4对，如果多于4对，那么 $Ab = 0$ 的解是超定的，如果所有的匹配点的位置是精确的，那么 $Ab = 0$ 的解仍然是精确的，但是通常情况匹配点中有噪声，存在错误匹配等问题，所以这时候方程存在最小二乘解（超定解）。除了零解可以忽略外，方程解可以通过奇异值分解找到近似解。

奇异值分解（Singular Value Decomposition, SVD）可以将一个矩阵，无论是否满秩，均可以分解为 $A = UDV^T$ 形式，其中 $UU^T = I$ 和 $VV^T = I$ ，即 U 和 V 是正交矩阵， D 是对角阵，对角元素非负。实际上SVD可以看做特征值分解的推广，SVD在主成分分析，求解方程的最小二乘解中广泛应用。回到求解单应性变换的问题，根据SVD求解最小二乘解的原理，可以得到：最小二乘解是 $A^T A$ 的最小特征值的特征向量。具体而言，假设有n个匹配点，则 A 为 $2n \times 9$ 的矩阵，且 $A = UDV^T$ ，且 D 对角阵元素按降序排列，那么 b 是 V 的最后一列。因为 $Ab = 0$ 的解是 A 的零空间，而且 $\text{rank}(A) = n - 1$ ，所以 A 的零空间只有一个基向量，即SVD中最小特征值对应的特征向量 V 的最后一列。

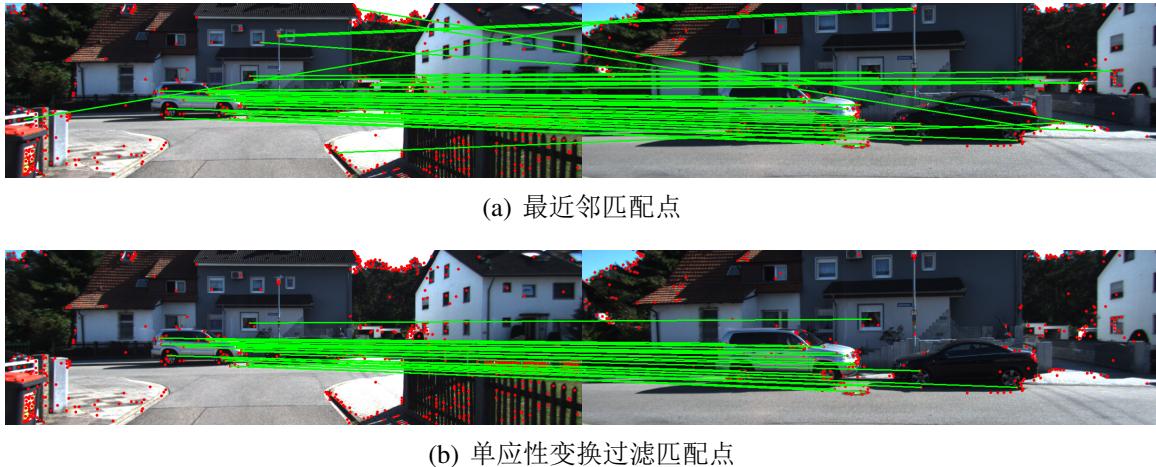


图 3.14 KITTI-0400与KITTI-0415单应性刷选结果

奇异值分解是广泛用于图像处理中的一种算法，不仅在求单应性矩阵时使用，下文亦有涉及。但是在这里介绍一种本文使用到的另一种方法——随机抽样一致性（Random Sample Consensus, RANSAC），该方法在图像领域中也广泛应用，其根本理论是统计原理，可以通过多次迭代的方法估计含有噪声数据模型的参数。RANSAC一般过程为从一组含有外点（噪声）的数据中随机选取数个数据，估计模型参数，然后将估计得到的模型应用于剩余的其他数据，从而得到该模型的误差，重复以上过程，直到误差达到某设定阈值或迭代次数达到设定最大次数，停止迭代，选取最优的一组模型作为最终结果。根据最终结果与事先设定的阈值可以过滤一部分外点并得到较为精确的模型。由此可知，估计单应性变换需要4对匹配点即可计算一个单应性变换，所以RANSAC每次选取4对匹配点迭代计算得到单应性矩阵，而后将单应性矩阵应用于剩余的匹配点，计算误差，过滤外点。如上图3.14与下图3.15所示，其中a是仅根据SIFT描述子通过最近邻匹配过滤的结果。b是使用RANSAC方法通过单应性变换过滤的结果，从图中可以直观看出使用RANSAC可以过滤掉一部分错误的匹配。

同样从表3.1中也可以看出，其中对角线上的数字表示图3.14与3.15中三张原始图片（KITTI-0400、KITTI-0415、KITTI-0424）提取到的SIFT特征点数量，其他表格中的数值，例如55/32分别表示使用RANSAC方法前得到的匹配点数目，以及使用RANSAC后过滤剩下的匹配点。

经过各种方法，得到的图片匹配点基本上是正确的，基于此我们可以对数据集中无序图片构建它们的关联结构，对于多张图片对应的同一个匹配点，设置统一标号，称为track。例如图片一中第125个特征点，图片二中第259个特征点，图片三中

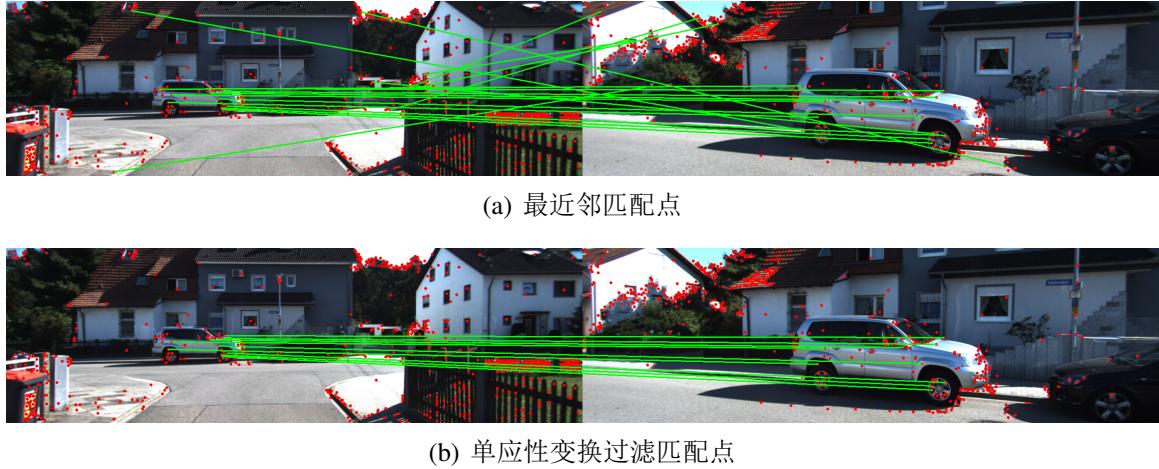


图 3.15 KITTI-0400与KITTI-0424单应性刷选结果

表 3.1 匹配点过滤

图片名 特征点	KITTI-0400	KITTI-0415	KITTI-0424
KITTI-0400	861	55/32	75/46
KITTI-0415		370	19/10
KITTI-0424			599

第6个特征点等匹配，实际上它们对应实际地理空间的同一个点，所以可以使用同一个track序号标记这些匹配点。当然同一个track序号在某张图片所有匹配特征点中只能出现一次，这很容易理解，一张图片里不可能出现与自身匹配的特征点，据此也可以过滤一部分错误匹配。如此可以使整个数据集通过特征点匹配构成关联关系，为下面的多视图重建打下基础。

3.6 多视图重建

本节内容主要介绍如何通过多视图几何知识，恢复匹配特征点的三维空间结构，以及摄像机位姿等相关信息，本节内容采用增量式SfM的方法，首先从track点最多的两张图片入手，恢复两视图匹配特征点的三维空间位置与两视图对应的摄像机的相关关系，而后加入第三张图片，计算第三张图片与前两张图片得到的3D点的关系，使用三角测量方法还原第三张图片的特征点3D位置坐标，如此循环。其中每加入一张图片使用光束平差法优化3D点与相机位姿。最终得到较为理想的点云数据。

3.6.1 两视图重建

在式 3.9 中, z_c 为每个像素的深度, 在单目成像时, z_c 是未知的。所以当知道某点的世界坐标系时, 很容易得到该点的像素坐标, 但是反之, 已知该点像素坐标无法得到其世界坐标。所以从单张图像中无法还原场景的三维结构, 所以下文介绍从两张存在特征点匹配的图片中恢复场景的三维结构。两视图几何最核心的原理是对极约束, 在阐述对极约束相关知识之前, 我们先复习一下 3.3 节中关于摄像机成像过程涉及的相关坐标系。如果三维空间的一个点 X , 其在相机所成的像坐标为 x , 则有 $\lambda x = P X = k[R \ t]X$, 其中 λ 表示每个像素的深度, $[R \ t]$ 表示摄像机坐标系与世界坐标系的刚体变换。

对极约束基础是两视图同时观察到真实空间的同一个物体, 分别用 C_1, C_2 表示两视图的摄像头光心坐标, 其同时看到三维世界中同一点, 该点在 C_1 为原点的坐标系的三维坐标为 X_1 , 在 C_2 为原点的坐标系的三维坐标为 X_2 。该对极几何中, 世界坐标原点选为 C_1 , 坐标轴与该相机坐标系相同, 所以对于 C_1 表示的相机成像矩阵 $P = K[I \ 0]$, 而对于 C_2 表示的相机成像矩阵 $P = k[R \ t]$, 所以 $X_2 = RX_1 + t$, 表示 C_1 为原点的坐标系的点经过 R, t 可以转换到 C_2 为原点的坐标系表示的过程。在 C_2 为原点的坐标系中, 我们可以得到如图 3.16 中橙色三角形三边对应的矢量为 $t, X_2 - X_1, X_2 - t$, 其中 $X_2 - t = RX_1$ 。

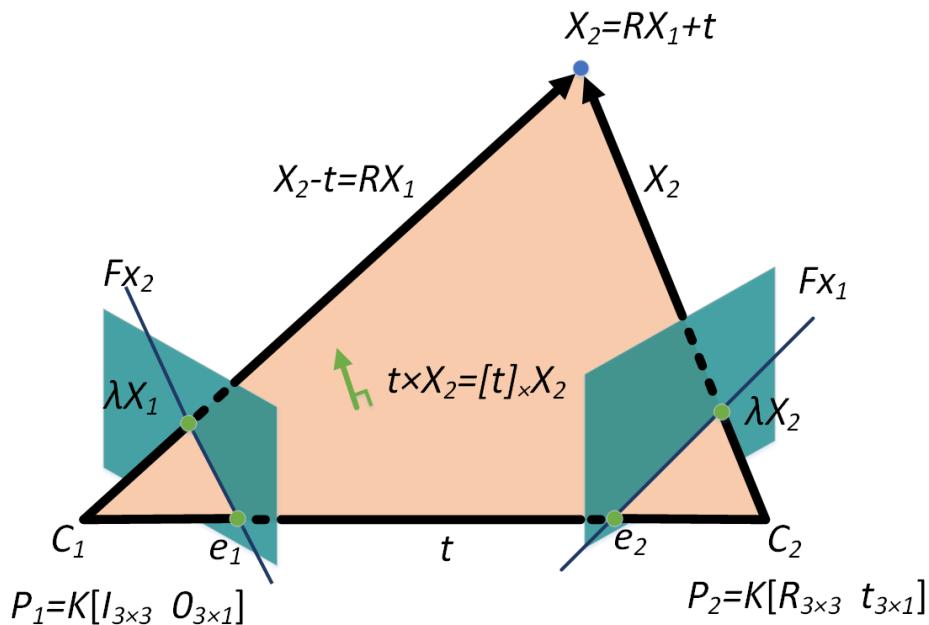


图 3.16 对极几何约束

由于三边共面有向量的混合积为零，如式 3.20 所示。式中 $[t]_{\times}X_2 = t \times X_2$ 表示垂直于图 3.16 橙色平面的向量（绿色箭头）。最后式 3.20 用简洁形式表示为 $-X_2^T E X_1 = 0$ ，其中 $E = [t]_{\times} R$ ，Longuet Higgins 首先发现的这一关系并称 E 为本质矩阵。本质矩阵是 3×3 的矩阵，它将旋转与平移的复杂关系简洁形式地表达出来。

$$\begin{aligned} (X_2 - t)^T \cdot [t]_{\times} X_2 &= 0 \\ (R X_1)^T \cdot [t]_{\times} X_2 &= 0 \\ -X_2^T [t]_{\times} R X_1 &= 0 \end{aligned} \tag{3.20}$$

这里还有几个概念需要介绍一下，所有由 3D 点，相机中心 C_1, C_2 组成的平面与成像平面相交于两条直线（图 3.16 中蓝色直线 Fx_1, Fx_2 ）， C_1 成像平面中一点 λX_1 对应的极线为橙色平面与 C_2 成像平面的交线（图 3.16 中蓝线 Fx_1 ）。如果改变 3D 点的位置形成另外一个橙色平面，其与成像平面的交线为另外一条极线，所有形成的极线交于一点，该点称为极点（图 3.16 中 e_1, e_2 ）。已知点 x 在直线上的充要条件是 $x^T L = 0$ ，从极线约束 $-X_2^T E X_1 = 0$ 与齐次坐标的性质，可以得到 $E X_1$ 是过 X_2 的直线，也就是与 C_2 成像平面的极线平行的直线，由于所有的极线 $E x_1$ 都通过同一个点（极点 e_2 ），所以 $e_2^T E = 0, E e_1 = 0$ 。极点与极线的关系由图 3.17 可以证明，图(a)中的点匹配图(b)中同颜色的点，对应的极线为图(b)中同颜色的直线，可以看出图(b)中每条直线经过图(a)匹配的特征点，而这些极线交于一点，即极点。

针对极点与极线的关系，本文使用对极约束过滤错误匹配点。在两视图 A、B 中，A 视图的特征点对应在 B 视图中的极线与其在 B 视图匹配的特征点的欧拉距离小于 9 个像素，则认为该对特征点的匹配是有效的。按照这一原则，在使用上文提到的最近邻方法去除错误匹配后，又可以去除一部分错误匹配。通过极点与极线距离过滤匹配点同时考虑了两视图的几何关系，而上文提到的最近邻匹配方法仅考虑特征描述子的数值关系。

已知 $K X_1 = x_1$ ，其中 K 为内参矩阵， X_1 表示 C_1 为原点的坐标系中三维点坐标， x_1 表示 C_1 的像素坐标系中二维点坐标。这里和上文相同都是其次坐标，所以是在齐次意义上相等。带入 $-X_2^T E X_1 = 0$ 中有式 3.21，其中 F 称为基本矩阵， $\text{rank}(F) = 2$ ， F 的



(a) 左视图中的特征点



(b) 右视图中的特征点与对应极线

图 3.17 极点与极线的关系

自由度为8。

$$\begin{aligned} X_2^T E X_1 &= 0 \\ x_2^T k^{-T} E k^{-1} x_1 &= 0 \\ x_2^T F x_1 &= 0 \end{aligned} \tag{3.21}$$

基于式 3.21 可以得到下式 3.22。

$$\begin{bmatrix} u_i^2 & v_i^2 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_{11} & f_{12} & f_{13} \\ f_{21} & f_{22} & f_{23} \\ f_{31} & f_{32} & f_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_i^1 \\ v_i^1 \\ 1 \end{bmatrix} = 0 \tag{3.22}$$

根据式 3.22，一对匹配点可以得到一个方程，所以至少需要8对匹配点才能计算得到矩阵 F 。如式 3.23 所示，可以简写为 $AX = 0$ ，与上文计算单应性矩阵的方法相同，由于匹配点远不止8对，所以此时方程存在最小二乘解，使用SVD对左边矩阵分解得 UDV^T ，则基本矩阵即为 V 的最后一列重新排列成 3×3 的形式，当然最后还需要保证 $\text{rank}(F) = 2$ ，这可以通过将 F 进行 SVD 分解并使最小奇异值为零得到秩为2的 F 。

至此我们可以根据至少8对匹配点解算出基本矩阵 F ，该方法称为八点法，在两视图重建中被广泛使用。另外一种方法是使用RANSAC代替SVD分解，避免噪声带来的影响，需要注意八点法选取的8对匹配点不能共面。

$$\begin{bmatrix} u_1^1 u_1^2 & u_1^1 v_1^2 & u_1^1 & v_1^1 u_1^2 & v_1^1 v_1^2 & v_1^1 & u_1^2 & v_1^2 & 1 \\ u_2^1 u_2^2 & u_2^1 v_2^2 & u_2^1 & v_2^1 u_2^2 & v_2^1 v_2^2 & v_2^1 & u_2^2 & v_2^2 & 1 \\ \vdots & \vdots \\ u_8^1 u_8^2 & u_8^1 v_8^2 & u_8^1 & v_8^1 u_8^2 & v_8^1 v_8^2 & v_8^1 & u_8^2 & v_8^2 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_{11} \\ f_{21} \\ f_{31} \\ f_{12} \\ f_{22} \\ f_{32} \\ f_{31} \\ f_{32} \\ f_{33} \end{bmatrix} = 0 \quad (3.23)$$

在得到基本矩阵 F 后，如果已知相机内参矩阵 K ，则可以得到本质矩阵 E ，由示意图3.18所示，从本质矩阵可以恢复相机之间的旋转平移关系。

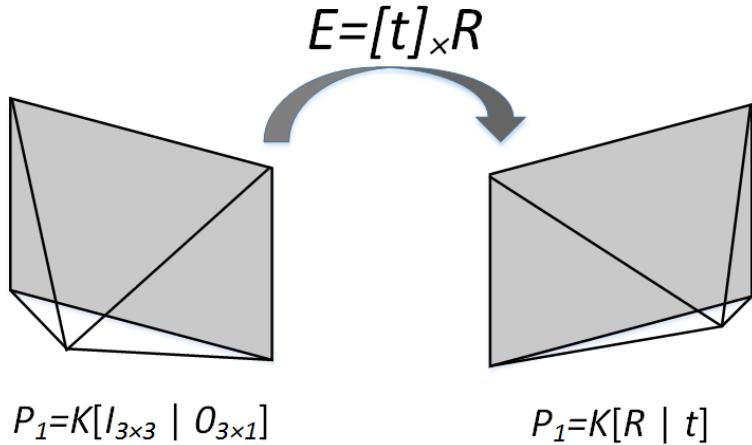


图 3.18 本质矩阵恢复旋转平移关系

由于 $P_2[0, 0, 0, 1]^T = [R | t][0, 0, 0, 1]^T = t$ ，且 $e_2^T E = 0$ ，故有 $t^T E = 0$ ，由SVD知 t 是 E 的左零空间，所以 $t = U[:, -1]$ ，即 E 奇异值分解后 U 的最后一列，因此 $t = -u_3, u_3$ ，故有式3.24，其中 $U = [u_1 \ u_2 \ t]$ 。

$$E = U \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} V^T = [t] \times R = U \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} U^T | U Y V^T \quad (3.24)$$

据式 3.24 可以得到下式 3.25:

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} Y \quad (3.25)$$

因此可以得到矩阵 Y 的值, Y or $Y^T = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$, 所以 R 有两种可能值, 这是因为 $R = U Y V^T$ 。

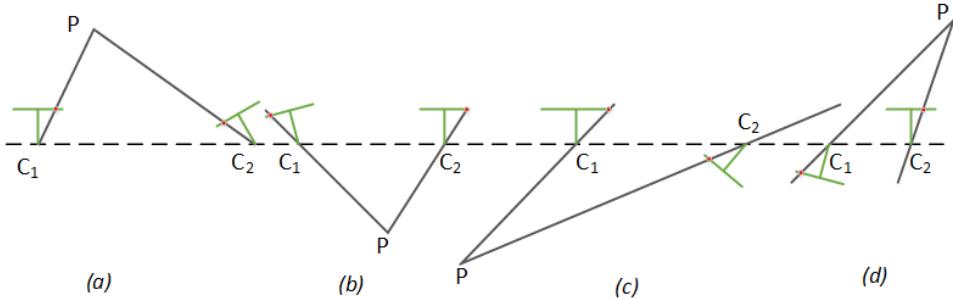


图 3.19 分解本质矩阵得到的四个解

综上通过 E 恢复旋转矩阵 R 和平移矩阵 t 有四种可能的解, 图 3.19 形象地显示了分解本质矩阵得到四个解的过程。保持成像平面的点 (红点) 不变的情况下, 可以画出四种可能情况, 但只有(a)是正确的, 因为其有正深度, 所以恢复旋转与平移后需要将 3D 点带入图四个解中, 检测该点在两个相机中的深度, 即可确定 R 和 t 。实际上利用 E 的内在性质, 使用“五点法”可以解算得到 E , 其只有五个自由度: 旋转(3), 平移(3), 缩放因子。但“五点法”形式复杂, 所以本文还是采用上文介绍的八点法计算旋转、平移关系。

3.6.2 三角定位法

在得到相机的位姿后, 需要恢复匹配点的三维坐标信息, 该方法称为三角测量

(Triangulation)，三角测量指不同视角观察同一个点的夹角，确定该点的位置。三角测量最早由高斯提出并应用于天文学中。在SfM中，我们使用三角测量估计匹配点的像素深度。

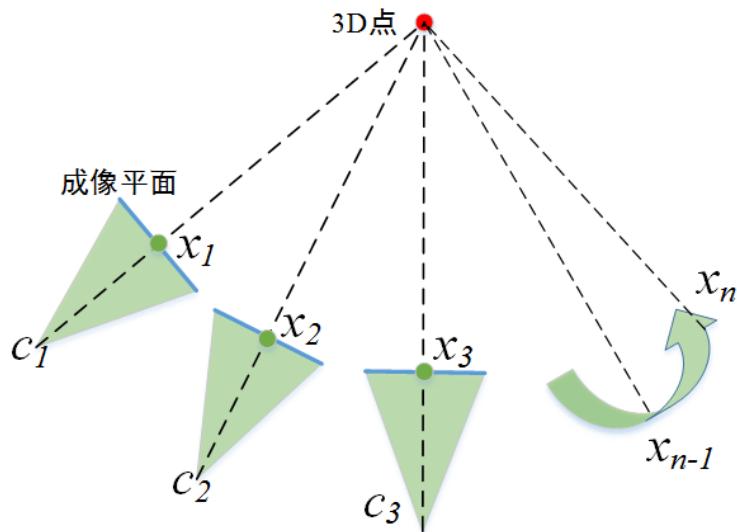


图 3.20 三角测量示意图

小孔相机成像模型简化为 $\lambda x_1 = P_1 X_1$ ，即 $[x_1] \times P_1 X_1 = 0$ ，由于一个视图可以提供两个方程，所以只需要两个视图即可计算得到3D点坐标，但是由于噪声的影响，空间中的两视图射线不一定交于一点，所以使用两视图恢复出来的三维点坐标存在不准确的问题，所以一般情况下使用多视图进行三角测量恢复多视图匹配的3D点坐标，如图 3.20 所示，多个视图匹配的同一个3D点在不同视图成像平面的投影为 x_1, x_2, \dots, x_n ，这些投影点具有相同的track序号（第三章第二节末提到的定义），当从多视图中恢复3D位置坐标，该问题又归为对式 3.26 进行奇异值分解求最小二乘解的问题。将式 3.26 简写为 $[A_{3n \times 4}]X = 0$ ，由于 $\text{rank}([A_{3n \times 4}]) = 2$ 所以对 A 进行SVD分解， V 的最后一列就是 A 的右零空间，也就是3D点的位置坐标。

三角测量的多视图必须存在平移关系，否则单纯的旋转无法使用三角测量，因为此时对极约束永远满足。在平移存在的情况下，三角测量存在不确定性，当平移很小时，射线夹角很小，计算得到的像素深度不确定性很大；但是平移太大后，图像变换会较大，导致匹配失效。所以三角测量时，需要考虑多视图夹角，也就是多视图平移大小的影响。

$$\begin{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ v_1 \\ 1 \\ u_2 \\ v_2 \\ 1 \\ \vdots \end{bmatrix} & P_1 \\ & \times \\ & P_2 \\ & \times \\ & \vdots \end{bmatrix}_{3n \times 4} = 0 \quad (3.26)$$

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix}_{4 \times 1}$$

3.6.3 2D-3D位姿求解

经过以上计算，我们可以得到初始的两视图匹配点的3D位置坐标，也就是我们通过两视图匹配关系得到场景的特征点3D位置坐标，或者称为稀疏点云，以及两视图的空间几何关系。至此加入第三张匹配的图片，这时就存在如何计算第三张图片对应的相机与刚刚三角测量得到的点云的空间位置关系，完成这一步才能继续增加其他图片，完成对数据集的增量式重建过程。

PnP(Perspective-n-Point)是用来求解3D到2D匹配点的几何关系。新图片能通过解决PnP问题与当前的点云模型（两视图或者多视图得到的）配准。PnP问题被用来估计相机位姿，包括未矫正相机的内参矩阵。我们知道对极几何估计2D-2D位置关系，一般使用“八点法”。但是如果两张图像其中一张特征点的3D位置已知，那么最少需要三对匹配点就可以估计相机运动，该方法称为P3P。特征点的3D位置可以由上文的三角测量或者深度传感器确定。3D-2D方法不需要使用对极约束，又可以使用很少的匹配点进行运动估计，其有多种解法，包括直接线性方法(DLT)、P3P、EPnP(Efficient PnP)、非线性优化构建最小二乘问题求解，本文选用直接线性方法求解PnP问题。

$$\begin{aligned}
& \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} P_1 \\ P_2 \\ P_3 \end{bmatrix} X = \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} P_1 X \\ P_2 X \\ P_3 X \end{bmatrix} \\
&= \begin{bmatrix} 0 & -1 & v \\ 1 & 0 & -u \\ -v & u & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X^T & 0_{1 \times 4} & 0_{1 \times 4} \\ 0_{1 \times 4} & X^T & 0_{1 \times 4} \\ 0_{1 \times 4} & 0_{1 \times 4} & X^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_1^T \\ P_2^T \\ P_3^T \end{bmatrix} \quad (3.27) \\
&= \begin{bmatrix} 0_{1 \times 4} & -X^T & vX^T \\ X^T & 0_{1 \times 4} & -uX^T \\ -vX^T & uX^T & 0_{1 \times 4} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_1^T \\ P_2^T \\ P_3^T \end{bmatrix} = 0
\end{aligned}$$

marked as $A_1 b = 0$

本文仅介绍使用直接线性方法结合SVD分解，其他方法不一一展开，首先回忆最经典的小孔成像模型 $\lambda x_1 = P_1 X_1$ ，即 $[x_1] \times P_1 X_1 = 0$ ，其中 P 为未知量，2D坐标 x 与3D坐标 X 都是已知量，参照求单应性矩阵的方法，我们可以把推导写成如式 3.27 所示，其中每对匹配点仅能提供两个方程，所以 $\text{rank}(A) = 2$ ， A 为 3×12 矩阵， b 为 12×1 的矩阵，所以至少需要6对匹配点才能计算得到位置关系矩阵 b 。此时等式简写为 3.28 的组合矩阵，其中每对3D-2D匹配点可以写成类似 A_1 的形式。此时可以对式 3.28 中最左边的组合矩阵运用SVD求解。对于实际中匹配点数量大于6对时，SVD求得的是最小二乘解（超定解）。

$$\begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \\ \dots \\ A_6 \end{bmatrix} b = 0 \quad (3.28)$$

通过以上方法，我们可以得到矩阵 P ，由于 $P = K[R|t]$ ，所以旋转矩阵 $R = K^{-1}P_{[1:3]}$ ($P_{[1:3]}$ 表示 P 的前三列)，由于旋转阵 R 是正交矩阵，为了保证这一性质，所

以旋转矩阵取式 3.29 中 R_+

$$\begin{aligned} R &= UDV^T \\ R_+ &= UV^T \end{aligned} \quad (3.29)$$

在得到正交旋转矩阵后，需要恢复平移矩阵 t ，方法如式 3.30 所示，最后 $P = K[R_+ t]$

$$\begin{aligned} R &= UDV^T \\ D &= \text{diag}(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3) \\ \sigma_1 &> \sigma_2 > \sigma_3 \\ t &= K^{-1} \frac{P_4}{\sigma_1} \end{aligned} \quad (3.30)$$

3.7 三维重建中的优化

以上介绍如何使用多视图几何知识计算相机位姿与特征点的3D坐标，一般是先计算相机位姿，后计算特征点3D坐标。而本章要介绍的非线性优化问题正是将相机位姿与特征点3D位置放在一起同时优化，实际上Structure from Motion 中 structure 指特征点3D坐标，而 motion 指相机位姿，但是图像配准（Image Registration）和三角测量（Triangulation）分别独立计算必然导致一定的误差，因为二者是紧密关联的：相机姿态的不确定性将增加三角测量的不确定性，反之亦然。没有对二者计算结果的优化，SfM 将很快离散到难以恢复的状态。本文将介绍同时优化相机位姿与3D点坐标的常用方法，称为光束平差法，主要实现方式是最小化重投影误差。

3.7.1 光束平差法

BA 是对相机位姿矩阵 P_c 与 3D 点 X_k 的非线性优化方法，其最小化重投影误差如式 3.31，其中函数 $f(x)$ 表示 3D 点的重投影误差，函数 τ 是 3D 点在成像平面的投影的像坐标， ρ_j 是损失函数，用来降低外点带来的影响。

$$x^* = \arg \min_x \sum_{j=1}^k \|f_j(x)\|^2 = \arg \min_x \sum_{j=1}^k \|\tau_j(x) - b\|^2 \quad (3.31)$$

为解决该问题，使用最多的方法是梯度下降法，该算法是解决非线性最小二乘问题的通用方法，BA实际上就是非线性最小二乘问题。我们一般使用Levenberg-Marquardt (LM)^[42]近似梯度下降法，LM将非线性问题转变为一系列正则线性问题。设 $J(x)$ 是 $f(x)$ 或 τ 的雅各比矩阵，最小化重投影误差如式 3.32所示。

$$\min_x \|\tau(x) - b\|^2 = \min_x (\tau(x) - b)^T (\tau(x) - b) = \min_x \tau(x)^T \tau(x) - 2b^T \tau(x) \quad (3.32)$$

对式 3.32求导数有

$$2 \frac{\partial \tau(x)}{\partial x}^T \tau(x) - 2 \frac{\partial \tau(x)}{\partial x} b = 0 \quad (3.33)$$

其中

$$J = \frac{\partial \tau(x)}{\partial x} = \frac{\partial f(x)}{\partial x} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \vdots & \frac{\partial f_1}{\partial x_n} \\ \frac{\partial f_2}{\partial x_1} & \vdots & \frac{\partial f_2}{\partial x_n} \\ \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial f_m}{\partial x_1} & \vdots & \frac{\partial f_m}{\partial x_n} \end{bmatrix} \quad (3.34)$$

雅各比矩阵反映存在 m 个约束条件的误差函数的变化率，雅各比矩阵的 m 一般不等于 n ， m 表示组成 $f(x)$ 的等式个数， n 表示与 $f(x)$ 相关的变量个数，下文会详细解释在光束平差法中这些变量代表的意义。对式中的 $f(x)$ 泰勒展开如式 3.35，最终结果可简写为 $J^T J \Delta x = -J^T f$ ，其中 $J^T J$ 称为Hessian矩阵。

$$\begin{aligned} 2 \frac{\partial \tau(x)}{\partial x}^T (\tau(x) + \frac{\partial \tau(x)}{\partial x} \Delta x) - 2 \frac{\partial \tau(x)}{\partial x} b &= 0 \\ \frac{\partial \tau(x)}{\partial x}^T \frac{\partial \tau(x)}{\partial x} \Delta x &= \frac{\partial \tau(x)}{\partial x}^T (b - \tau(x)) \\ \Delta x &= (J^T J)^{-1} J^T (b - \tau(x)) \end{aligned} \quad (3.35)$$

式 3.35的推导结果称为高斯牛顿法，而LM是基于高斯牛顿法得到的，只是在迭代步长时不使用 $\Delta x = (J^T J)^{-1} J^T f$ ，而改为 $\Delta x = (J^T J + \lambda D(x)^T D(x))^{-1} J^T f$ ，其中 $D(x)$ 是非负对角矩阵，是 $J^T J$ 的对角元素的平方根，式中 $J^T J + \lambda D(x)^T D(x)$ 称为增广Hessian矩阵。相较高斯牛顿法，LM的优点是可以动态调节 Δx ，当下降太快时，使用较小的 λ ，反之亦然。经过上面的计算我们知道实际上光束平差法是一种非线性最小二乘法，关键是如何计算 $f(x)$ 的雅各比矩阵 J ，即 $f(x)$ 的梯度，并最终计算步长 Δx ，直至重投影误差收敛至最小。

由上所述可知，BA中雅各比矩阵的计算至关重要，雅各比矩阵随着相机与3D点的数目增加而维度增加。当一个相机内仅可见一个3D点时雅各比矩阵的形式如图3.21所示，其中 R, C, X, q 分别表示旋转、相机中心（即平移）、3D点和四元数表示的旋转。

$$J_{\text{part}} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f(R(q), C, X)}{\partial R} & \frac{\partial R}{\partial q} & \frac{\partial f(R(q), C, X)}{\partial C} & \frac{\partial f(R(q), C, X)}{\partial X} \\ 2 \times 9 & 9 \times 4 & 2 \times 3 & 2 \times 3 \end{bmatrix}$$

图 3.21 雅各比矩阵

BA 中针对多个相机多个3D点的雅各比矩阵形式如下所述，最小化误差函数存在 $6(F - 1)$ 个运动约束和 $3N - 1$ 个结构约束， F 指相机个数， N 指3D点的个数，这可以理解为第一个相机为基准，所以不计入考虑，而每个相机有6个约束条件，即旋转(3)、相机中心(3)，每个3D点都是3个约束条件，但是缺失一个尺度，所以减去1。Hessian矩阵 $J^T J$ 的维数为 $(6F + 3N - 7) \times (6F + 3N - 7)$ 。既然如此，由于3D点与相机数量非常庞大，所以BA得到的雅各比矩阵与Hessian矩阵维数也很大。如图3.22所示，当两视图可见同一个3D点是雅各比矩阵如式3.22所示。

$$J = \begin{bmatrix} \text{Left View} & 0_{2 \times 7} & 3D \text{ Point} & 0_{2 \times 3} \\ 0_{2 \times 7} & \text{Right View} & 3D \text{ Point} & 0_{2 \times 3} \\ \text{Left View} & 0_{2 \times 7} & 0_{2 \times 3} & 3D \text{ Point} \\ 0_{2 \times 7} & \text{Right View} & 0_{2 \times 3} & 3D \text{ Point} \end{bmatrix}$$

图 3.22 雅各比矩阵示意图

当得到雅各比矩阵后，需要计算迭代步长，以最小化误差函数。为了下文分析方便，我们设 $U = J_c^T J_c$, $V = J_p^T J_p$, $U_\lambda = U + \lambda D_c^T D_c$, $V_\lambda = V + \lambda D_p^T D_p$, $W = J_c^T J_p$, 下标 c 表示与相机参数有关的向量，下标 p 表示与3D坐标点参数有关的向量，可以将式 $\Delta x = (J^T J + \lambda D(x)^T D(x))^{-1} J^T (b - f(x))$ 写为分块矩阵形式，如式3.36所示。其中，

U_λ 和 V_λ 是分块对角矩阵，对此可以采用舒尔补方法（Schur Complement）高效求解该方程。

$$\begin{bmatrix} U_\lambda & W \\ W^T & V_\lambda \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x_c \\ \Delta x_p \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} J_c^T f \\ J_p^T f \end{bmatrix} \quad (3.36)$$

考虑求解线性系统 $M[x_1, x_2]^T = [b_1, b_2]^T$ ，式 3.37 表示分块矩阵 M 的分解过程。其中， $\bar{D} = D - CA^{-1}B$ ，且 A 需是非奇异方阵， \bar{D} 被称为舒尔补。

$$M = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ CA^{-1} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A & 0 \\ 0 & \bar{D} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & A^{-1}B \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.37)$$

利用矩阵 $\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -CA^{-1} & 1 \end{bmatrix}$ 左乘该线性系统，有下式，其中 $\bar{b}_2 = b_2 - CA^{-1}b_1$ 。

$$\begin{bmatrix} A & B \\ 0 & \bar{D} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_1 \\ \bar{b}_2 \end{bmatrix} \quad (3.38)$$

至此我们可以得到一个降阶系统 $\bar{D}x_2 = \bar{b}_2$ ，求解 x_2 后，回带解算 x_1 。回归光束平差法本身，由 3.36 可以得到降阶系统 3.39 和 3.40，矩阵 $S = (U_\lambda - WV_\lambda^{-1}W^T)$ 称为舒尔补。

$$(U_\lambda - WV_\lambda^{-1}W^T)\Delta x_c = -J_c f + W^T V_\lambda^{-1} J_p^T f \quad (3.39)$$

$$\Delta x_p = -V_\lambda^{-1}(J_p^T f + W^T \Delta x_c) \quad (3.40)$$

S 是对称正定矩阵，使用 Cholesky 分解可以求解式 3.39。以上求解 BA 问题的方法之所以有效，是由于相机数量要远小于 3D 点数量，所以可以先求解 Δx_c ，再求解 Δx_p 。

3.7.2 最小化相机中心位置误差

上节介绍了使用舒尔补的方法简化线性系统，求解使重投影误差最小的 $\Delta x_c, \Delta x_p$ ，其中涉及到的变量有旋转、相机中心（平移）、3D 点坐标，而本节将介绍一种优化方法：最小化相机中心位置误差。通过图片我们可以提取相机的 EXIF (Exchangeable Image File Format) 信息，从而得到相机的经纬度坐标。EXIF 是由数码相机制造商在图像、音频中标记的相机、频率等的标准格式文件。EXIF 包含的信息丰富，可以从中找到相机拍摄时所处的经纬高信息，也可以从中提取相机模型，包括焦距等，也包括

相机制造厂商，甚至相机位姿等。

同一个3D点在两视图中的左视图的相机坐标系中坐标为 X_1 ，在右视图的相机坐标系中坐标为 X_2 ，已知两视图相机位姿关系 R, t ，则坐标可以表示为 $RX_1 + t = X_2$ 。对于右视图相机中心这一3D点，有 $X_2 = 0$ ，则该点在左视图的相机坐标系中的坐标为 $X_1 = -R^T t$ ，旋转矩阵是正交矩阵有 $R^T = R^{-1}$ 。所以在多视图中每个视图与第一个视图的位姿关系为 R_i, t_i ，则这些视图对应的相机中心坐标在第一视图的相机坐标系中的坐标为 $-R_i^T t_i$ 。这样我们就建立每个视图的经纬高 $pos = (Lon_i, Lat_i, Hig_i)$ 与其相对于第一视图的位姿关系 $-R_i^T t_i$ ，基于此我们可以建立最小二乘问题如式 3.41。

$$E_{pos} = \arg \min_{R, t} \sum_{i=1} \|f_i(x)\| = \sum_i (\|-R_i^T t_i - pos\|_2^2) \quad (3.41)$$

相对于最小化重投影误差的过程，该过程只调整相机相关参数，没有涉及3D点相关的调整，所以只作为BA的辅助步骤，也可以认为这属于光束平差法的一部分。

本节介绍了基本的稀疏点云生成的过程，包括多视图几何知识从匹配点恢复结构，而后增量式的重建其他图片；在每加入一张图片时，使用BA优化相机位姿与3D点的位置，在同时最小化相机中心位置误差。图 3.23(b)是使用CeresSolver库迭代三次优化重投影误差的结果，同时BA后移除重投影误差大于14个像素的3D点（外点）得到以下结果。初始重投影误差代价为34.83778平方像素，BA优化后的代价为17.32320平方像素，没有满足条件的外点。将BA前的3D点与BA优化后的3D点重新投回到成像平面上，结果如 3.23所示。两张图对比可以看出BA 最小化重投影误差的作用，(a)仅使用多视图几何计算相机位姿并使用三角测量恢复3D点位置，而(b)增加BA环节，图中橙色空心圆点是提取的2D特征点坐标，蓝色实心圆点是3D 点根据相机 R, t 关系投影到成像平面的点，从中可以看出BA对重投影误差有明显改善作用，可以去除误差较大的3D 点并且可以将误差均摊到所有3D点上。

3.8 稀疏点云的稠密化

通过SfM方法，不仅可以得到相机位姿，也可以恢复特征点的三维坐标得到稀疏点云，但是由于点云过于稀疏难以用于UGV导航与规划，所以本文使用Multiple View Stereo(MVS)技术将点云稠密化，MVS可以分为基于体素（voxel），基于表面演化（surface evolution）、基于特征点生长（feature point growing）和基于深度图融合（depth-map merging）四种类型^[45]。本文采用深度图融合的方法^[46]得到稠密点云，该



图 3.23 BA对比结果图

方法包括深度图计算与深度图融合两部分，可以用图 3.24 表示整个过程。

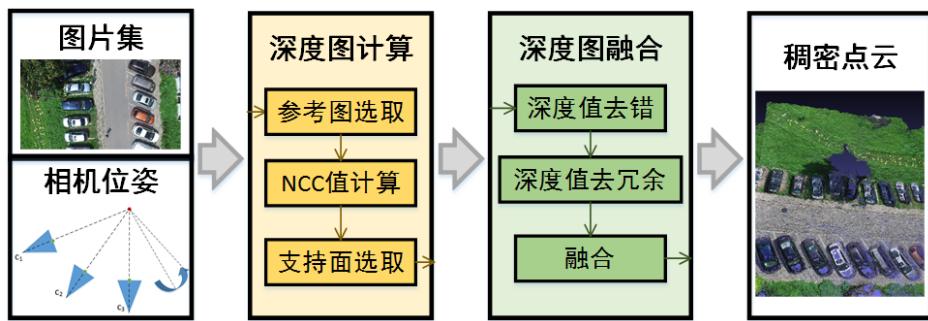


图 3.24 点云稠密化流程图

3.8.1 深度图计算

基于SfM方法，我们可以得到图像数据集下所有图像对应的相机位姿关系与特征点3D坐标，利用这些位姿关系，可以完成接下来的深度图计算过程。对于单个图像无法计算深度图，深度图的计算首先需要为每张图像选取其参考图（Reference Images），而后根据参考图与自身的旋转平移关系（通过SfM得到），计算每张图像的深度图。双目相机是基于双目成像互为参考图从而计算得到深度图；然而对于无序的图像数据集，参考图的选取至关重要。本文参考Shen^[45]的方法设置参考图阈值，假设有 n 张图像， $\theta_{ij}, j = 1, \dots, n$ 表示第 i 张图像与其他图像 $1, \dots, n$ 的相机主轴夹角， θ_{ij} 用 i 与 j 图片匹配的特征点之间夹角的平均值表示。同时每张图像与其参考图对应相机的距离称为基线，记为 d_{ij} ，基线的距离太长则两张图像重叠区域太小，太短则使重建精度降低，选择满足 $5^\circ < \theta_{ij} < 60^\circ$, $d_{ij} < 0.05\bar{d}$ 或 $d_{ij} > 2\bar{d}$ (\bar{d} 表示所有图像平均基线距离) 的图像作为参考图，按照 $\theta_{ij} d_{ij}$ 降序排序参考图，取前10张（如果有）作为参考图。

根据Bleyer^[47]的方法使用上文刷选的参考图计算深度图，主要思想是遍历图像的每个像素，为其找到一个支持面，使该支持面在参考图中有最小汇总匹配代价，整个过程如图 3.25 所示。其中支持面 f 由法线 n_i 与 3D 点 X_i 决定，两视图几何中，以一个相机的相机坐标系作为世界坐标系，则有 $P = [I_{3 \times 3} | 0_{3 \times 1}]$, $P' = [R | t]$, 空间平面的齐次表达式为 $\pi^T X = 0$, 其中 $\pi = (V^T, 1)^T$, $V^T = (V_1, V_2, V_3)$, 由于 X_i 在面 π 上, 所以有 $|V^T| = \left| \frac{1}{X_i} \right|$, 而方向与 n_i 相反, 故 $V^T = -\frac{n_i^T}{n_i^T X_i}$ 。

相机 i 由 K_i, R_i, C_i 表示, 参考图对应的相机用 K_j, R_j, C_j 表示, 现在设世界坐标系中心为相机 i , 则相机坐标系间的旋转平移关系变为 $P_i = K_i[I_{3 \times 3} | 0_3]$, $P_j = K_j[R_j R_i^{-1} | R_j(C_i - C_j)]$ 根据吴福朝^[48] 有两视图间的单应性可以用式 3.42 表示。

$$H = K_j(R - tV^T)K_i^{-1} = K_j(R_j R_i^{-1} + R_j \frac{(C_i - C_j)n_i^T}{n_i^T X_i})K_i^{-1} \quad (3.42)$$

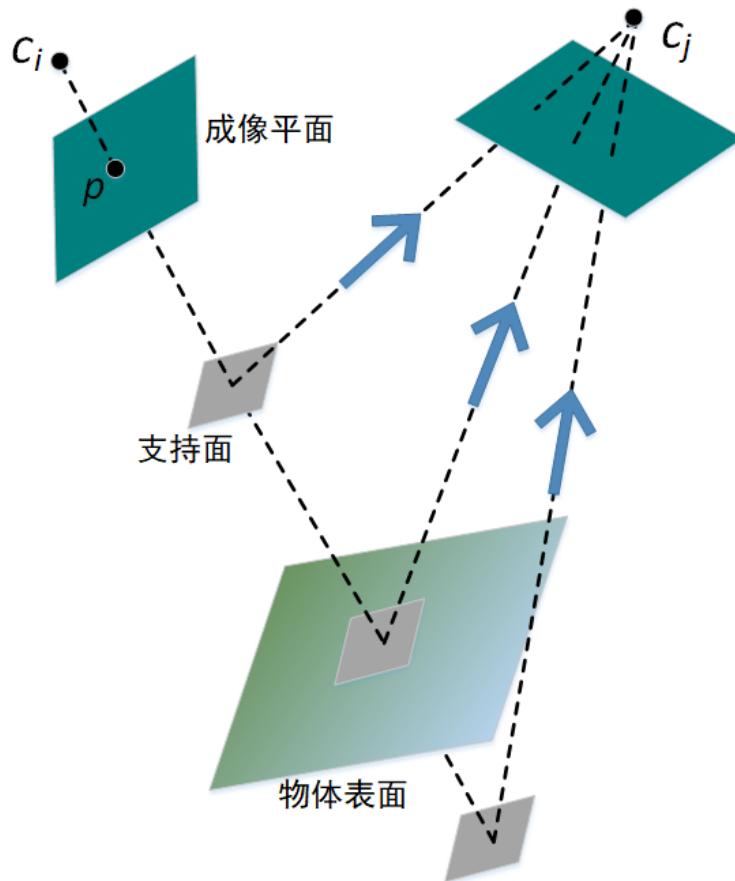


图 3.25 最小汇总匹配代价计算过程

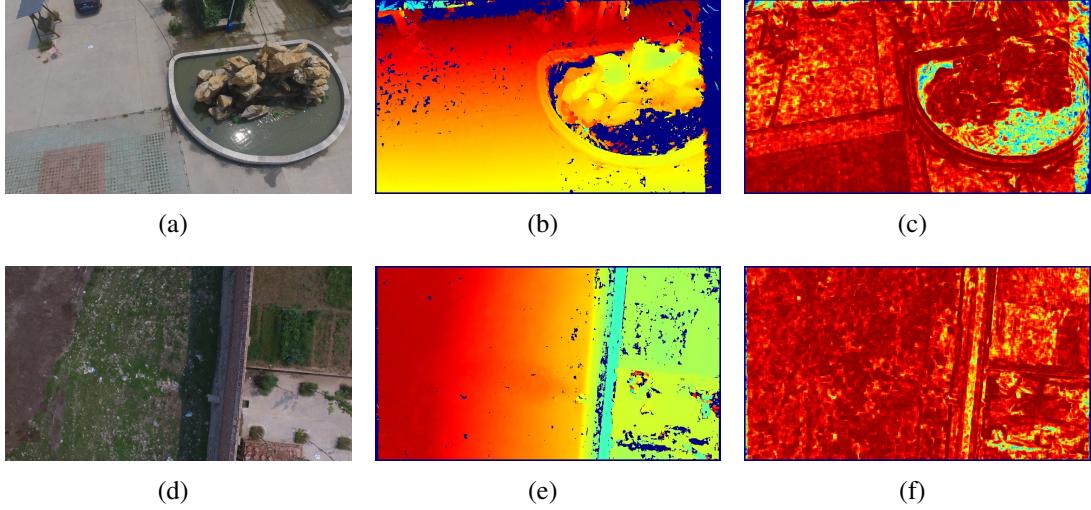


图 3.26 深度图与NCC值

图 3.25 中支持面 f (Patch) 以 p 为中心, 大小为 7×7 像素的正方形块, 对于 patch 中的每个像素通过式 3.42 转换到参考图中, 记为 H_{ij} , 此时可以求出 7×7 所有像素 q 的代价和 $m(p, f_p)$, 称为去均值的归一化互相关 (NCC, Normalized Cross Correlation), 如式 3.43 所示, 其中上划线表示所有像素点的平均值。

$$m(p, f_p) = 1 - \frac{\sum_{q \in patch} (q - \bar{q})(H_{ij}(q) - \overline{H_{ij}(q)})}{\sqrt{\sum_{q \in patch} (q - \bar{q})^2 \sum_{q \in patch} (H_{ij}(q) - \overline{H_{ij}(q)})^2}} \quad (3.43)$$

据此可计算数据集中每张图像的深度图与图像中每个像素对应的 NCC 值, 如图 3.26 所示, 图 (b), (e) 为深度图, 图 (c), (f) 为 NCC 值图, 图中使用冷暖色表示像素值的大小, 颜色越暖表示像素值越大。图 3.26(c) 较冷 (蓝色) 的区域表示用来计算深度图的图像与参考图对应 Patch 区域像素误差较大, 当大于一定阈值时, 证明该区域的深度计算是不准确的, 故对应图 3.26(e) 的深度设为零, 为最浅色 (蓝色) 部分。对于深度图而言颜色越暖证明深度越大, 图 3.26(e) 很好反映了一面竖直墙导致图像深度的变化情况。

3.8.2 深度图融合

在得到每张图像的深度图之后, 需要将各个深度图融合得到完成的场景图, 由于图像存在重叠区域, 所以直接融合深度图会在重叠区域产生深度冗余, 所以深度图的融合就是去除冗余深度的过程。将图 i 每个像素点 x 通过上文计算得到的深度重新投影

到3D空间为 $X = \lambda R_i^T K_i^{-1}x + C_i$, 而*i*的参考图 $j = 1,..h$ 也可以得到对应图*i*中每个像素的深度, 这个深度可以通过参考图的深度图计算得到, 记为 $\lambda(X, j)$, 对于依赖图*i*的深度图得到的坐标X可以转换到参考图的相机坐标系中得到X对应的像素深度 $d(X, i)$, 如果 $d(X, i) < \lambda(X, j)$ 或 $\frac{|d(X, i) - \lambda(X, j)|}{\lambda(X, j)} > \epsilon$, 则移除参考图中该像素的深度。

3.9 本章小结

鉴于三维地图可以提供更丰富的地理空间信息, 在UGV仿真、实验中有着广阔的应用前景, 本章提出一种基于航拍图像的三维地图构建算法, 并给出了算法的实现流程。本该算法的特征点提取与匹配过程中, 本章采用基于SIFT特征点提取和描述的方法, 并结合对极约束算法与特征点track序号的逻辑关系, 有效地过滤错误匹配点。在算法的位姿优化过程中, 相对于传统的最小化重投影误差, 本文增加了基于相机地理位置的最小化相机中心距离, 优化相机的旋转与平移矩阵。在稀疏点云的稠密化中, 本文针对航拍图像分辨率较高的特点, 采用基于块的点云稠密方法, 以去均值的NCC作为块匹配代价函数得到数据集中每张图像中每个像素的深度, 由于图像存在重叠区域, 所以深度图的融合也存在冗余深度的问题, 通过精炼深度图, 从而去除冗余或错误的深度值, 从而完成深度图的融合, 得到稠密点云。

第4章 二维图像中的道路提取

4.1 引言

近年来许多方法被应用于无人地面车辆自主导航，尤其是采用高精度地图提高UGV导航定位、场景理解能力的方法获得巨大成功。大部分UGV依靠详细路网地图导航，然后这些路网地图基本都靠手工完成的，如此限制了当前UGV的大范围普及。道路提取算法被广泛研究并用于车辆导航与区域分割领域，这些算法对于UGV有很好的效果，然而对于UAV这些算法不尽人意。这是因为UGV的相机朝前安装而UAV相机俯视地面，UGV视野中道路在视野尽头一般收敛为消失点，针对消失点的提取道路的方法在UAV上效果较差，为了解决这一问题本文提出了使用图像二值化并结合道路拓扑关系对航拍图像进行道路提取。

4.2 图像二值化

本文采用最小二乘法提取道路区域得到二值化的图像。在实际工程中我们总是希望找到数据的线性关系，不幸的是对于实际数据找到这样完美的线性关系不容易，然而最小二乘法提供了一种可信赖的最小化残差方法，这展示了观测与拟合之间的差别。考虑到某区域道路颜色特征基本一致的特点，本文采用线性最小二乘的方法拟合图像道路区域的RGB颜色特征，得到道路的二值化图。



图 4.1 训练集

首先从航拍图片中找到一部分道路区域作为训练的样本集，如图 4.1 中红色方框内部的道路区域，将训练集中的图片分为 RGB 三个通道展示在三维空间坐标系中，如图 4.2 中蓝色点所示，而后使用最小二乘法拟合这些观测值（蓝色点）为一条直线 $\frac{x+x_1}{a} = \frac{y+y_1}{b} = \frac{z}{1}$ ，如图 4.2 中红色直线所示，最后可以计算所有观测点与拟合直线之间的平均欧式距离 D 。对于需要处理的图片，也就是测试集数据，遍历图片的每个像素，如果测试集像素与拟合直线的欧氏距离大于 $3D$ ，则将该像素赋值为零，否则赋值为一，进而得到和原图大小相同的二值图，按照这种方法每张 UAV 图片都可以转化为二值图。

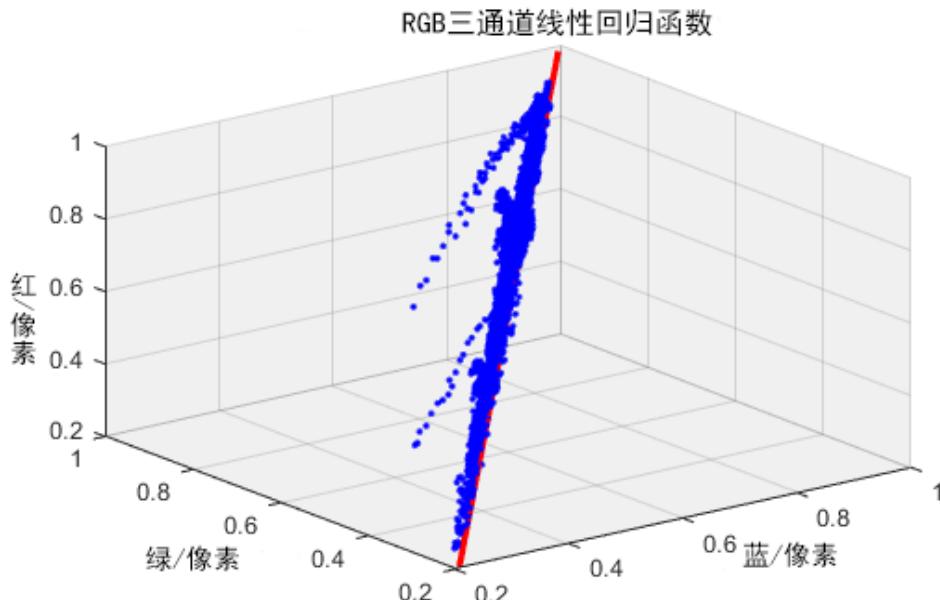


图 4.2 线性回归

4.3 非道路区域移除

通过最小二乘法拟合初始道路区域，然而得到的结果含有很多的噪声和错误的道路检测，为了减少噪声和误差，本文采用数学形态学平滑实验结果。数学形态学是基于拓扑的图像分析学科，基本的操作有开闭运算、俯视膨胀运算和形态学梯度运算等。道路有显而易见的不同于图片周围物体的形态学特征——瘦长。这些拓扑特征可以被用来消除二值图中的非道路区域，精炼二值图。

4.3.1 开闭运算

最小二乘法得到的二值图中存在许多噪声，例如小孔等，这影响了道路的完整

性，本文采用开闭运算移除孔洞，消除噪声，平滑道路区域。开运算是先腐蚀图片后膨胀图片的运算，而闭运算正好相反，是先膨胀后腐蚀图片，式 4.1 和 4.2 所示。其中二值图像的腐蚀是指选择大小一定的核函数 K ， K 一般是方阵，则二值图像 I 被 K 腐蚀可以理解为 K 在 I 内部移动时， K 的中心经过的区域即为腐蚀后的 I 的值。二值图像的膨胀是指选择大小一定的核函数 K ， K 一般为方阵，则二值图像 I 被 K 膨胀可以理解为 K 的中心在 I 内部移动时， K 所经过的区域。腐蚀膨胀的示意图如图 4.3 所示，左图深蓝色为腐蚀掉的像素，右图浅蓝色为膨胀而增加的像素。

$$\text{Open}(I, K) = \text{dilate}(\text{erode}(I, k), K) \quad (4.1)$$

$$\text{Close}(I, K) = \text{erode}(\text{dilate}(I, k), K) \quad (4.2)$$

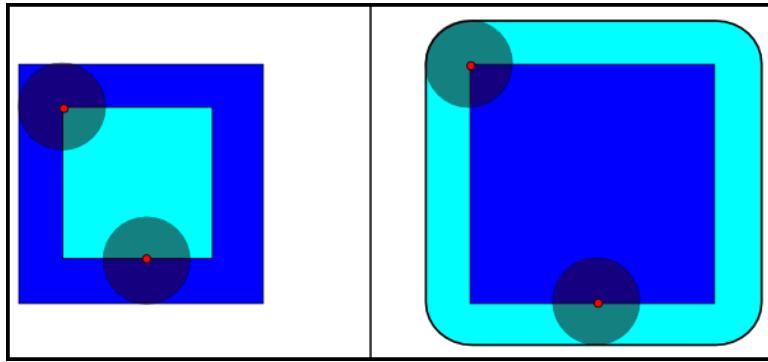


图 4.3 腐蚀膨胀示意图

基于开闭运算的方法，道路区域被平滑，大量干扰（噪声）被移除，但是仍然存在非道路区域干扰，例如房子边缘被错误识别为道路，由于这些区域面积较大，所以基于开闭运算的方法无法移除这些区域，所以采用以下方法去除非道路区域的干扰。

4.3.2 轮廓提取

Ramer Douglas Peucker 算法（简称 RDP）是由 Ramer、David Douglas 和 Thomas Peucker 提出的^[43]，通过物体轮廓估计物体形状。满足式 4.3、4.4 与 4.5 的轮廓被认为是需要移除的房屋边缘。

$$\|C - C'\| \leq 10\%C \quad (4.3)$$

$$60^\circ \leq \theta \leq 100^\circ \quad (4.4)$$

$$\frac{L}{L'} \leq 6 \quad or \quad \frac{L}{L'} \geq \frac{1}{6} \quad (4.5)$$

其中， C 、 C' 代表原始轮廓与近似轮廓的周长， θ 代表 C' 中每两个相邻顶点连线所成的角度。 L 和 L' 代表 C' 的相邻两边。按照以上判据可以检测到两个非道路区域，如4.4中红色矩形所示。至此，我们完成了形态学滤波得到较为理想的道路区域，然而

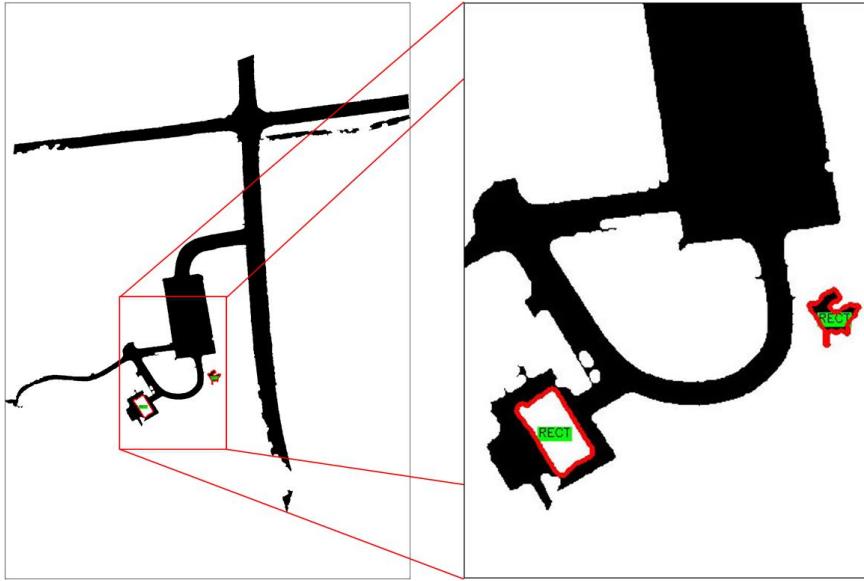


图 4.4 轮廓检测

这样的道路并不适合直接用于UGV路径规划与导航，因为UGV路径规划需要拓扑路网，下面将介绍如何从栅格道路提取道路骨架，得到拓扑路网的过程。

4.4 拓扑处理

4.4.1 拓扑细化

栅格地图可以转换为在UGV路径规划中广泛使用的拓扑地图，这种地图有基本几何元素组成，例如节点和弧线、直线等。Choi^[44] 使用拓扑细化的方法提取道路骨架，道路的宽度不会影响算法的有效性，图 4.5显示了拓扑细化算法的过程。

图中左边类似形态学处理后宽度不等的道路区域，右边类似拓扑细化处理后的道路骨架，可以看出线段宽度不影响最后得到的道路骨架结果。拓扑细化的目的就是剥离像素，直到无法剥离为止，从而得到单像素构成的拓扑骨架。对于构成道路的像素是否可以剥离取决于像素的连通数，连通数的概念由式 4.6和图 4.6定义。

$$C = \sum(N_k - N_k N_{k+1} N_{k+2}), k = 1, 3, 5, 7, N_9 = N_1 \quad (4.6)$$

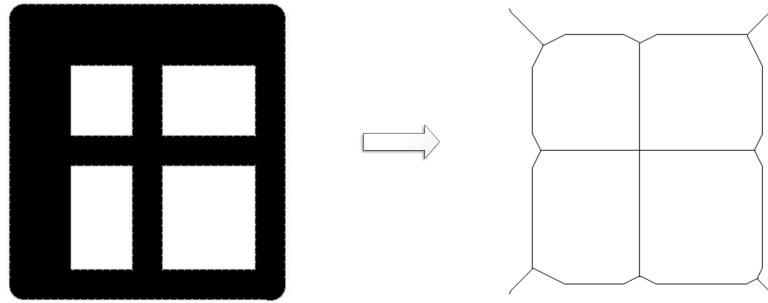


图 4.5 拓扑细化

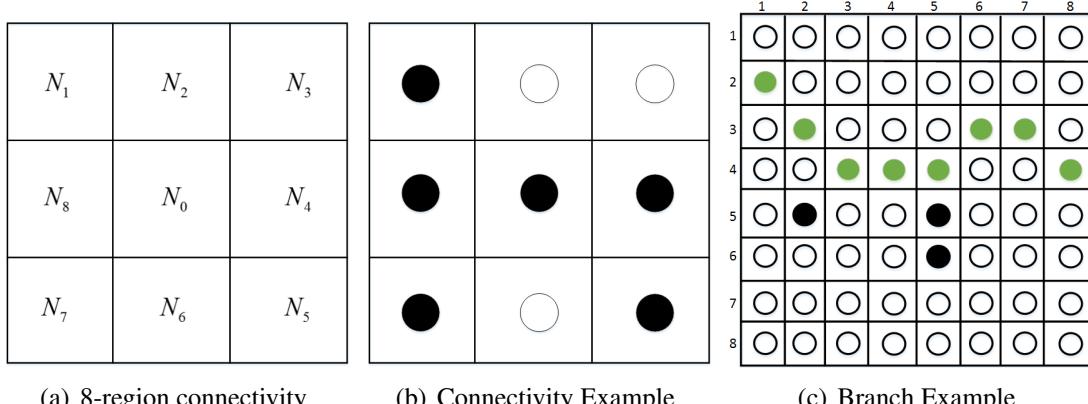


图 4.6 Connectivity

在图 4.6(a)中 N_i 表示以 N_0 为中心的8邻域中第*i*个像素大小，例如 $N_1 = 1, N_2 = 0$ ，二值图中像素值非0即1；根据式 4.6可以计算某像素的8邻域的连通数大小。如果一个像素的连通数等于1并且该像素不是端点（拓扑的起点或者终点），那么我们可以简化删除该像素简化拓扑关系。按照这一原则对于图 4.6(b)，其中黑色圆形对应的像素值为1，白色为0， N_0 的连通数 $C = 2$ ，所以 N_0 不可以删除；此时如果将图 4.6(b)的 N_6 设为1， N_0 的连通数变为1，且 N_0 不是端点，所以 N_0 可以被移除；同样如果 $N_4 = N_5 = N_7 = N_8 = 0$ ， N_0 不可移除，尽管 $C_{N_0} = 1$ ，但 N_0 为端点。按照拓扑细化的规则，遍历图片中所有像素，对每个像素采用拓扑细化的方法就可以得到基本的道路骨架。

4.4.2 拓扑精炼

拓扑细化的规则虽然能够得到保持道路的连通、完整，但是同时产生冗余的小枝丫，如图 4.5所示，本文提出了一种拓扑精炼方法，即从道路骨架中移除小枝丫的方法。该方法涉及连通度的概念，不同于拓扑细化中涉及的连通数概念，连通度的定义

如下：

- 一个像素的连通度：在8邻域中，一个像素直接与之相邻的像素个数，图4.6(b)中心像素的连通度是5。
- 道路骨架的端点：在8邻域中，一个像素与之相邻的像素仅一个，即连通度为1。
- 道路骨架的节点：一个像素与之相邻的像素个数大于2，例如图4.6(b)中心像素即为拓扑的节点，换句话说像素连通度大于2。
- 枝丫的长度：从端点到最近节点的像素个数。

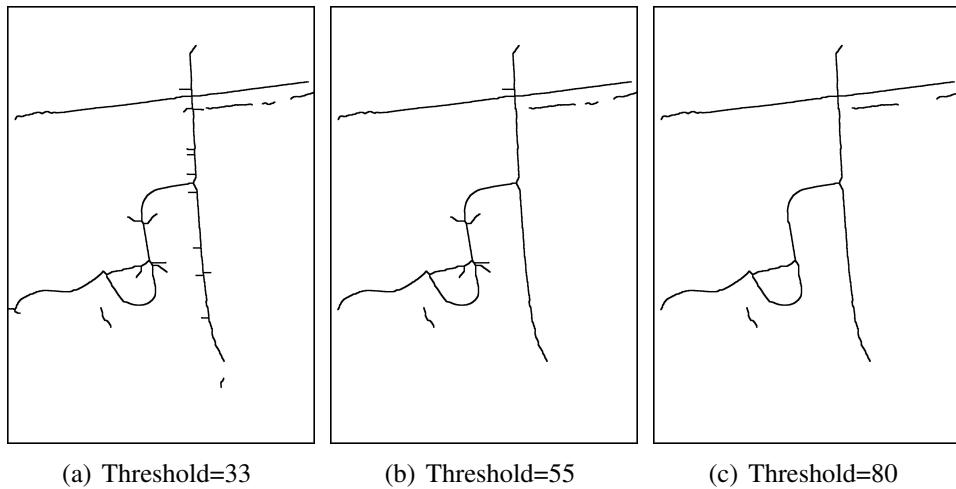


图 4.7 Branches Elimination

基于以上定义，我们可以推断图4.6(c)中 $P(1,2), P(2,5), P(5,6), P(8,4)$ 是端点， $P(3,4), P(5,4)$ 是道路节点，枝丫长度对于端点 $P(1,2), P(2,5), P(5,6), P(8,4)$ 分别为3, 1, 3, 4。实际道路枝丫通常较长，在图4.5中短的枝丫很显然并不属于真实道路骨架，设计逐渐增大的阈值，如果枝丫长度小于初始阈值，则该枝丫被移除。阈值逐渐增大，小于该阈值的枝丫被删除，直到阈值到达设定最大值，该过程结束。在图4.6(c)中，黑色点将被移除，剩下的绿点就是道路骨架。图4.7展示了阈值逐渐增大过程中，拓扑路网的简化过程。

4.5 本章小结

针对道路拓扑网络在UGV全局路径规划中的重要作用，本章提出一种基于航拍图像的道路提取方法。根据道路的光谱特征，使用最小二乘法拟合道路区域得

到二值图，而后采用开闭运算等方法平滑道路区域。鉴于拓扑矢量图更易于应用于UGV全局路径规划中，本章采用RDP算法从栅格化的二值图中提取道路骨架得到适用于UGV的拓扑网络。经过拓扑细化的道路区域虽然保持连通性，但也存在过多的冗余小枝丫，本文设计了通过计数枝丫长度去除小枝丫的方法。本章的方法简单实用，但对于复杂的道路仍然存在少量错误提取的道路网络，而这些可以手动加以修复。

第 5 章 实验结果分析

5.1 引言

本文简述基于全景图像的二维地图构建与基于航拍图像的三维地图构建方法，得到适用于无人驾驶的地图，并对地图中的道路进行提取，构建拓扑路网。本章将从实验结果出发，分析算法的有效性。实验分为三部分：二维、三维地图构建，道路提取。由于实验平台不同，将在各章节中独立介绍。实验将分析构图或道路提取的精度，并简述实验结果如何应用于无人驾驶中。

5.2 全景图像构建地图实验结果

5.2.1 全景图像地图实验平台搭建

本文提出的使用全景相机构建地图的方法使用的传感器包括Ladybug全景相机（图 ??）、差分GPS与捷联惯性导航系统构成的高精度组合定位系统，通过标定全景相机与车体后轴中点的相对位置，得到全景相机球面坐标系与车体坐标系的旋转平移关系，最后将全景图像（图 2.3）变换为逆透视图像（图 2.4），投影到地面，依据定位信息将单帧图像拼接为大范围地图。除了传感器外，本节实验使用的计算机为运行Windows 7 的台式机，CPU 型号为英特尔酷睿i7-5930K，主频为3.5GHz，内存为4通道32GB。算法由C++语言实现，使用OpenCV开源库。由于本节构建地图的范围较大，而拼接的图像需要导入GIS 软件（SuperMap）生成金字塔图以便加快地图的缩放等操作，该过程是逐像素操作的，所以需要较大的计算量与较大的内存。

5.2.2 全景图像地图构建效果及精度分析

图 5.1是使用本文提出的方法构建的二维地图，在2016年江苏常熟举办的无人车“未来挑战赛”中，团队采用该地图作为全局路径规划的依据，在无人车辆出发前，通过给定的任务点，依据地图信息进行全局路径规划，同时与GIS 软件结合，在UGV行驶过程中，为UGV提供道路先验信息等。

图 5.1(b)为图 5.1(a)的细节展示，其中(b)绿色方框内的点为无人车比赛时，车辆出发前路径规划得到的轨迹图，(b)上为左转变道过程，(b)下为U型转弯过程。

图 5.2(a)为使用本节提出的方法构建的常熟三环路网地图，地图所占区域面积约

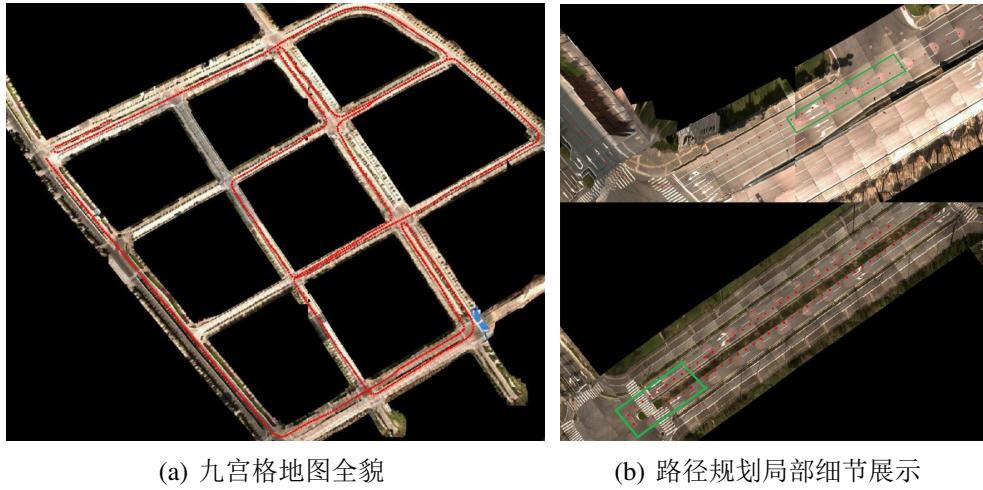


图 5.1 常熟UGV试验场

为 $12000 \times 8000 m^2$, 三环道路的细节部分展示在图 5.2(b)(c)中, 可以看出道路拼接良好, 车道线存在轻微错位现象, 这不影响实际比赛应用。

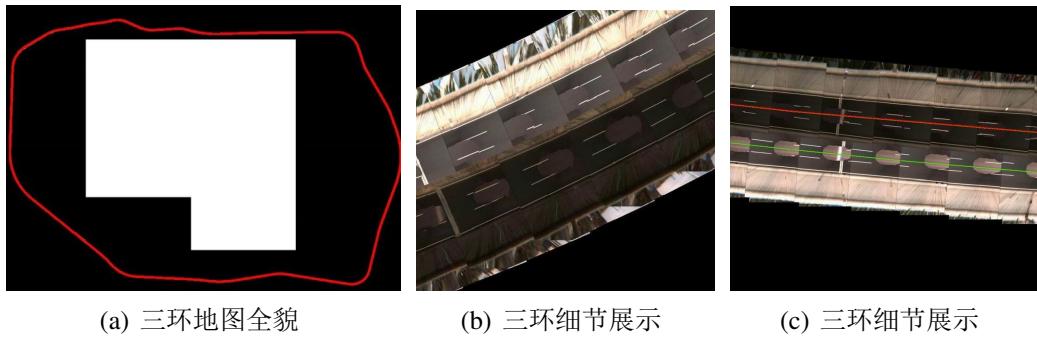


图 5.2 常熟三环路

本节提出的构建适用于UGV行驶的二维地图, 地图的精度很大程度取决于高精度组合定位系统的精度, 因为每帧图像是按照定位系统输出的位置与航向拼接而成; 其次需要考虑定位系统与全景相机的硬件同步, 由于两个传感器采集频率不同, 当采集到一帧图像时, 对应该帧图像的车体位置(严格讲是全景相机位置)需要严格同步才可能做到高精度地图, 最后就是全景图像逆透视变换时产生的形变也影响到构图的精度, 尤其是本算法默认除车体以外其他区域的高度与地面水平, 所以路边花坛、树木等变形严重, 无法作为后期制作地图的依据, 这三方面误差是导致本节提出构建地图误差的主要来源。这些误差受制于传感器算法、地形等因素, 所以很难量化, 故在此不做详细讨论。本节提出的构建地图的方法分别应用于国家自然基金委举办的2016常熟“未来挑战赛”与军方总装举办的“跨越险阻”比赛中, 在“未来挑战

赛”中绝大部分地图区域拥有接近车道级别的构图精度，但是在“跨越险阻”比赛中，由于山地崎岖、颠簸严重，所以构图精度低于城市环境的“未来挑战赛”。

5.3 地理空间三维重建实验结果

5.3.1 地理空间三维重建实验平台搭建



图 5.3 DJI M100

本节算法由C++/Python实现，SfM与MVS实现是基于OpenCV、OpenGV^[50]、Ceres Solver开源库，本研究使用运行Ubuntu 14.04 LTS操作系统的台式机，台式机CPU型号为英特尔酷睿i5-4570，CPU主频为3.2GHz，并配置8GB单通道内存，没有配置独立显卡。航拍图像采集工具为大疆（DJI）M100无人机，如图 5.3 所示。图像分辨率为 4000×2240 ，采集并存储于无人机相机的16GB SD卡中，用于本文实验后处理。

5.3.2 三维重建效果及精度分析

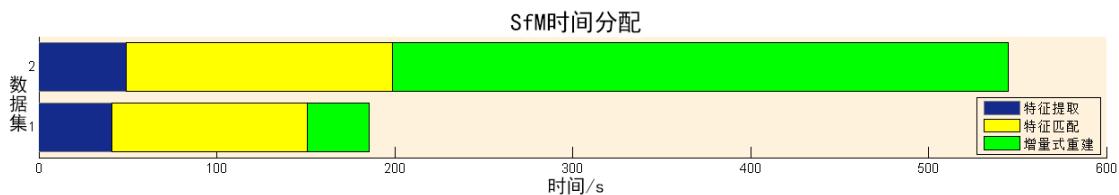


图 5.4 实验耗时测量

图 5.4 表示SfM过程两个数据集的耗时情况，其中数据集1表示雾岚山庄（56张图片），数据集2表示自动化学院（79张图片），实验调整图片分辨率为 2400×1350 。蓝

色直方图表示提取数据集中所有图像的SIFT 特征点并存储的耗时情况，黄色直方图表示的耗时包括使用FLANN匹配特征点，并使用对极约束去除错误匹配，而后将所有图片的匹配关系用track序号表示的过程，绿色表示接下来的重建过程，包括初始化、增量式重建过程，系统在Python 虚拟的多线程（4线程）上实现。

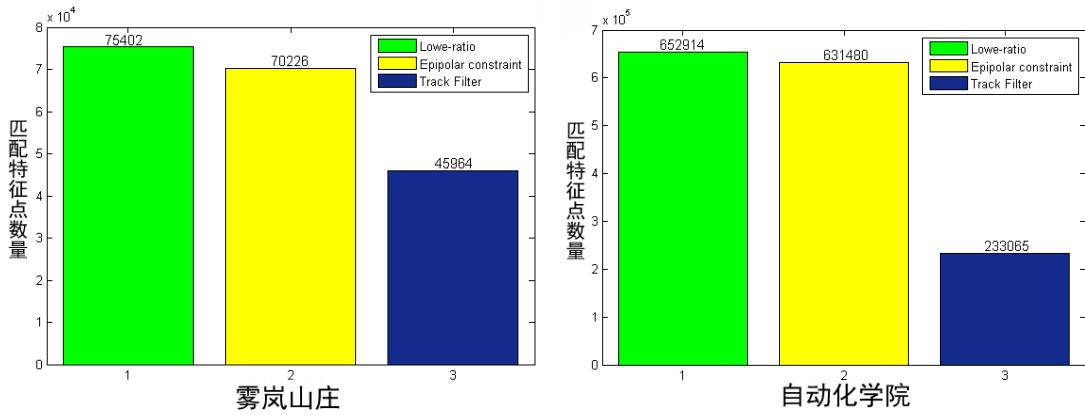
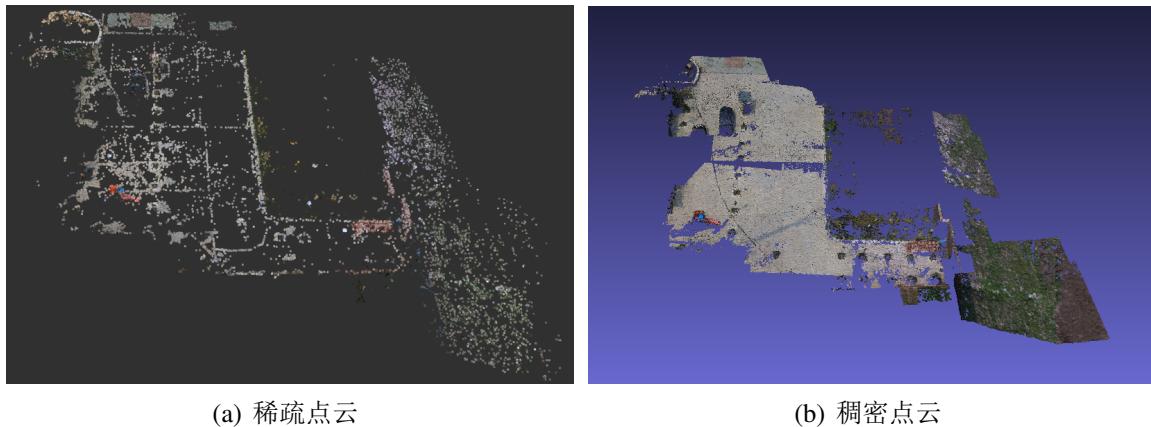


图 5.5 匹配特征点数量变化

三维重建的基础是正确的匹配数据集中所有图片的特征点，所以过滤错误的匹配特征点至关重要，图 5.5展示了不同方法过滤错误匹配特征点的情况，使用的数据集与上文描述相同。绿色表示使用Lowe提出的最近邻与次近邻比例小于0.8得到的匹配特征点数目。经过对极约束后剩下的特征点数目用黄色表示，即图片特征点与其对应极线距离不大于9个像素的特征点数目。在对极约束刷选结果基础上，通过匹配关系为每个特征点设置一个track序号，如果同一个track序号对应特征点所在视图存在名称相同的现象，则说明该匹配关系存在错误，删除该track序号对应的所有匹配特征点，剩余的特征点数目用蓝色表示。

如图 5.6所示，使用54张DJI M100无人机航拍图像得到的稀疏点云（图 5.6(a)）与稠密点云（图 5.6(b)），稀疏点云显示在RVIZ 中，其中每个点都是提取的SIFT 2D特征点还原的3D 点，稠密点云是使用基于深度图融合的方法得到并显示在Meshlab中。为了更好的衡量构图的精度，本文根据Turner^[49]测量构图精度的方法，采用设置地面控制点的方式，如图 5.7(a)所示，其中红色圆圈标记的白色纸张为设置的控制点。设置地面控制点的操作就是在构图区域使用高精度卫星定位系统测试真实场景某点（白色纸张的中心）的经纬度坐标，而后标记该场景所成二维图像中对应点的像素坐标（白纸中心成像后对应的像素坐标），如表 5.1 所示。从而在构建三维地图的同时，根据已知控制点的绝对地理位置坐标与其像素坐标得到整个三维模型的地理空间尺度，



(a) 稀疏点云

(b) 稠密点云

图 5.6 实验结果-雾岚山庄

可以直接作为GIS 数据库的输入数据，形成可以使用的地图信息。



(a)

(b)

图 5.7 地面控制点位置

本文在图 5.6 场景中设置了 9 个地面控制点，最后根据成像模型测得这 9 个点的坐标与实际使用 RTK（载波相位差分）GPS 接收机测量的真实结果对比，如表 5.2 所示，每个测试点的精度分为东向与北向，表最后一列为绝对误差，即东向北向误差的平方根，最后计算 9 个控制点的平均绝对误差为 1.586m，其中某些控制点误差较大时因为控制点处于整个地图的边缘位置，而三维重建中边缘区域变形较大。

表 5.1 地面控制点坐标

图片名称	坐标名称	东向	北向	图像X方向	图像Y方向
DJI_0050.JPG		415462.60	4401226.15	2706	1615
DJI_0054.JPG		415462.60	4401226.15	1312	438
DJI_0052.JPG		415462.60	4401226.15	2355	440
DJI_0077.JPG		415489.00	4401201.80	1011	1033
.....	

表 5.2 地面控制点误差测量

控制点序号	东向误差	北向误差	绝对误差
0	0.093	0.095	0.132
1	0.267	0.012	0.268
2	1.353	2.165	2.553
3	0.879	1.888	2.081
4	0.260	0.013	0.261
5	0.195	1.542	1.554
6	2.148	3.73	4.311
7	0.184	0.207	0.276
8	1.298	2.521	2.8355

与上文雾岚山庄数据集处理方法相似，通过79张图片可以得到自动化学院的三维地图结构，图 5.8(a)为稀疏点云在RVIZ中的显示效果，图 5.8(b)为稠密点云在Meshlab中的显示效果图。该数据集同样设置地面控制点以衡量构图精度，共有三个地面控制点，控制点在整个构图区域的分布如图5.7(b)所示，该图是展示在Google Earth中的效果，可以看出没有设置落在构图边缘的控制点，控制点整体分布均匀。

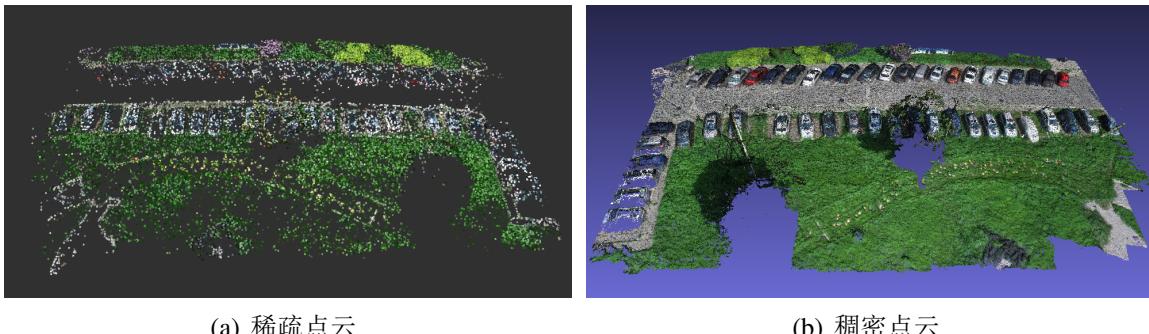


图 5.8 实验结果-自动化学院

表 5.3 地面控制点误差测量

控制点序号	东向误差	北向误差	绝对误差
0	0.184	0.378	0.421
1	0.856	1.676	1.883
2	0.141	0.262	0.298

最后通过实验得到真实值与测量值的对比结果，如表 5.3 所示，各列数据分别表示地面控制点的真实测量值与实验三维重建得到的模型对应点的东向、北向以及绝对误差值。由于三个点没有受到构图边缘变形的影响，所以结果稍好于雾岚山庄，得到平均控制点误差为0.867m。实际上由于本实验使用图片以及图片EXIF 信息中的

经纬高数据，但是实际上EXIF 中的经纬高数据不是很准确，误差约 $5m$ ，如果想要得到精度更高的地图，需要在构图时引入RTK，改善构图的精度。

5.4 道路提取精度分析

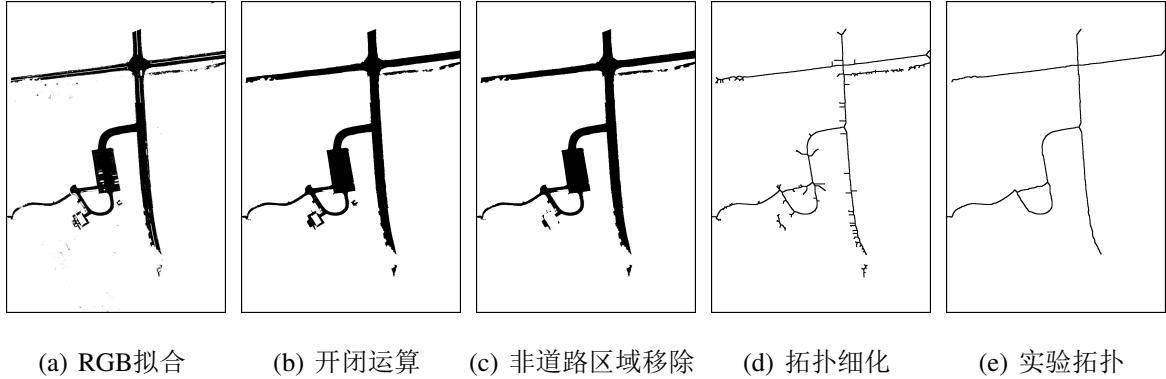


图 5.9 道路提取过程

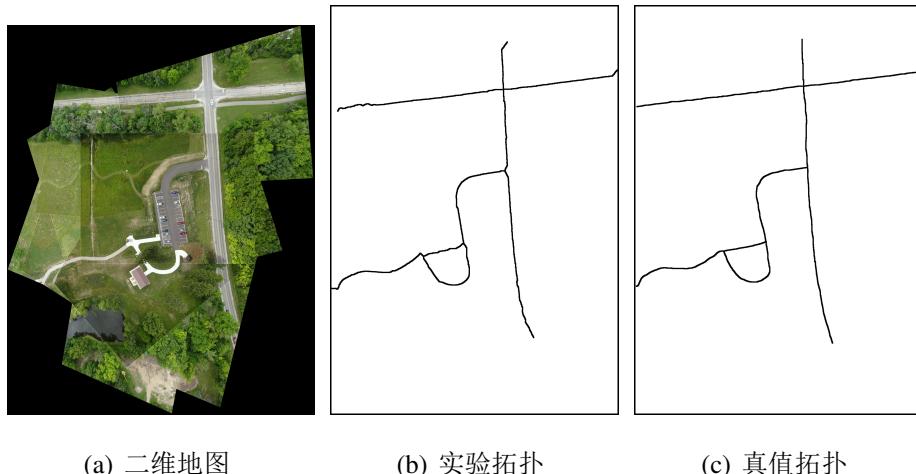


图 5.10 道路提取对比

根据第四章道路提取的方法，本节设计实验验证道路提取方法的精度。图 5.10(a)是用来提取道路的二维地图，由于单张航拍二维图像表示的道路区域无法形成拓扑网络，所以从单张航拍图像中提取道路，而后根据航拍原图间的单应性关系拼接得到如图 5.10(a)（原图拼接结果）和 5.9(a)（RGB拟合结果），而后应用本文提出的道路提取方法精细道路区域，拓扑细化得到最后的实验结果。整个过程如图 5.9所示，其中图 5.9(b)表示开闭运算平滑后的结果，图 5.9(c)为移除矩形非道路区域后的结果，

从中可以看出图左下方的房屋边沿被移除，图 5.9(d)为采用RDP算法进行拓扑细化后的结果，可以看出初始拓扑有很多小枝丫，使用逐渐递减的阈值精炼拓扑，去除小枝丫后如图 5.10(b)所示。

使用道路提取的方法得到道路拓扑网络后，图 5.10(a)分别展示了原图，提取道路（图 5.10(b)）与真实道路（图 5.10(c)），两幅图中道路拓扑是由单像素构成，通过膨胀真实道路，计算提取道路的像素不在膨胀后的真实道路区域的比例。据此绘制图 5.11，其中横轴代表膨胀时使用的核函数的大小，单位是像素，且一个像素代表地理空间约 $16cm$ ，核函数越大，膨胀后的真实道路区域越大，不在膨胀区域的提取道路的像素越少。从图中可以看出核函数大小为10个像素，即 $1.6m$ 时，有接近90%提取的道路在膨胀区域内，也就是90%的道路误差小于 $1.6m$ ，同样可以看出80% 的道路误差小于 $1m$ 。

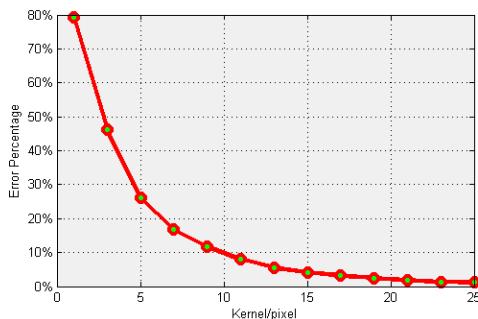


图 5.11 道路提取精度曲线

5.5 本章小结

本章是对本文提出的算法的实验结果与结论的总结说明，分为三部分。首先，介绍了二维地图构建使用硬件平台与软件环境，以及应用于实际比赛的构图结果，及应用于UGV全局路径规划的效果，并就影响构图精度的因素进行了分析。其次，介绍了三维重建的实验平台，并以两个数据集为例，定量地说明三维重建构造地理空间地图方法的精度，约为 $1m$ ，并分析了影响实验精度的原因。最后，本文测试了道路提取方法的精度，展示了每个过程的实验结果，并就提取的道路精度进行评价。实验的结果验证了本文提出的方法的有效性与真实性。

总结与展望

工作总结

无人驾驶的快速发展使高精度地图构建越来越重要，针对这一问题，本文提出了构建高精度二维地图与三维地图的方法，同时为了更好的将地图应用于UGV中，本文提出了从高空视角的航拍图像中提取道路的方法。本文的主要工作与创新点如下：

1. 本文设计了带有高精度定位信息的全景图像采集系统，并通过坐标变换、图像拼接等流程，提出了构建大范围二维地图的方法，并使用GIS软件配准地图，构建适用无人驾驶使用的地图数据库。该数据库应用于真实无人车比赛，获得较好的成绩。
2. 本文使用航拍图像结合当前先进的三维重建技术，获得地理空间的三维场景。其中使用图像EXIF信息中的GPS数据辅助图像匹配过程，提高了数据集图像特征匹配的效率。本文也充分利用相机GPS坐标最小化相机中心距离，优化多视图间的旋转平移关系，作为光束平差法的一部分。
3. 本文采用多种方法避免将错误匹配点用于重建，包括最近邻匹配去除模糊的匹配，使用对极约束计算匹配点间的几何关系，从而去除一部分误差大的匹配点，通过track序号对应的图像名称，删除逻辑关系不正确的匹配点。
4. 本文研究了航拍视角的道路提取方法，并对提取的道路进行拓扑细化，得到由单像素构成的道路拓扑网络，对此可以直接利用GIS软件生成线数据集，用于UGV自主导航规划。

未来展望

针对无人驾驶的高精度地图的构建一直是一个非常活跃的研究领域，随着相关传感器技术与感知技术的提高，构建高精度的三维地图，并将三维地图用于无人驾驶仿真与路测的研究将进一步深入，结合本文的研究内容与最新进展，有以下方面有待提高：

1. 本文设计的二维地图构建方法对远离全景相机的地面区域存在变形、不准确的缺点，在未来可以加入激光雷达，将激光雷达点云与全景相机配准并融合二者数据，得到高精度三维的带有真实纹理的点云数据。
2. 本文基本SfM框架进行地理空间三维场景建模研究，如何选取更合适的两视图用于初始化重建，对于有序图片提高重建效率，使用GPU进行并行计算等，这些问题

都没有涉及。因此在未来的研究中可以尝试吸取更先进的SfM算法思想，进一步提高完善三维重建技术。

3. 本文提出的道路提取算法采用简单有效的拟合道路光谱特征，但是对于道路颜色特征差别较大的区域，效果不理想，尤其是房屋干扰很难消除，所以在未来将采用深度学习的方法提取道路的抽象特征，并应用于大范围道路提取，相信在针对道路的二分类中，当道路训练样本足够多时，算法将获得较好的效果。

参考文献

- [1] Mattyus G, Wang S, Fidler S, et al. Enhancing Road Maps by Parsing Aerial Images Around the World[C] IEEE International Conference on Computer Vision. IEEE, 2015:1689-1697.
- [2] Mur-Artal R, Montiel J M M, Tardos J D. ORB-SLAM: a versatile and accurate monocular SLAM system[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2015, 31(5): 1147-1163.
- [3] Engel J, Schops T, Cremers D. LSD-SLAM: Large-scale direct monocular SLAM[C] European Conference on Computer Vision. Springer, Cham, 2014: 834-849.
- [4] Leonard J J. Large-scale concurrent mapping and localization[C] Proceedings of SPIE. 2000, 4196: 370-376.
- [5] Zhang J, Singh S. LOAM: Lidar Odometry and Mapping in Real-time[C] Robotics: Science and Systems. 2014, 2.
- [6] Carrivick J L, Smith M W, Quincey D J. Structure from Motion in the Geosciences[M]. John Wiley & Sons, 2016.
- [7] Jianhua Wang, Qiming Qin, Xiucheng Yang, Jun Wang, Xin Ye, Xuebin Qin. Automated road extraction from multi-resolution images using spectral information and texture[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium. 2014. 533-536.
- [8] 许谦. 基于无人车环境感知信息的GIS动态更新算法研究[D]. 北京理工大学, 2015.
- [9] 宋晓虎, 朱纪洪. 基于OpenStreetMap和90 m SRTM的地面向导航电子地图实现[J]. 地球信息科学学报, 2017, 19(7):901-908.
- [10] 李玉. 基于3D激光点云的无人车城市环境SLAM问题研究[D]. 北京理工大学, 2016.
- [11] Fan Q, Yi Y, Hao L, et al. Semantic motion segmentation for urban dynamic scene understanding[C] Automation Science and Engineering (CASE), 2016 IEEE International Conference on. IEEE, 2016: 497-502.
- [12] 段华旭, 闫飞, 庄严, 等. 无人车基于双目视觉的同时定位与地图构建[J]. 华中科技大学学报:自然科学版, 2015 (S1): 319-323.
- [13] 张毅, 尹亮. 无人车自主导航的环境建图技术[J]. 兵工学报, 2014 (S1): 32-37.
- [14] 邹智荣. 动态环境下自主车同时定位与建图研究[D]. 中南大学, 2012.
- [15] 谢斌, 张开石, 潘华东, 等. 未知环境中无人机适航地图构建与地面目标跟踪[J]. 浙江大学学

报: 工学版, 2010 (1): 118-123.

- [16] 刘洋, 章卫国, 李广文, 等. 一种三维环境中的无人机多路径规划方法[J]. 西北工业大学学报, 2014, 32(3): 412-416.
- [17] 陈含欣. 无人机视觉特征提取及同步定位与地图构建方法研究[D]. 南京航空航天大学, 2016.
- [18] 蒙山, 唐文名. 单目SLAM 直线匹配增强平面发现方法[J]. 2017.
- [19] 马跃龙, 赵勇, 曹雪峰. 一种基于单目SLAM 的无人机序列图像拼接方法[J]. 系统仿真学报, 2016 (2016 年10): 2349-2355.
- [20] 杨祥红, 王希彬. 无人机主动SLAM 技术研究[J]. 系统仿真技术, 2016 (2016 年04): 283-287.
- [21] Cole D M, Newman P M. Using laser range data for 3D SLAM in outdoor environments[C] Robotics and Automation, 2006. ICRA 2006. Proceedings 2006 IEEE International Conference on. IEEE, 2006: 1556-1563.
- [22] Diosi A, Taylor G, Kleeman L. Interactive SLAM using laser and advanced sonar[C] Robotics and Automation, 2005. ICRA 2005. Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on. IEEE, 2005: 1103-1108.
- [23] Snavely N, Seitz S M, Szeliski R. Photo tourism: exploring photo collections in 3D[C] ACM transactions on graphics (TOG). ACM, 2006, 25(3): 835-846.
- [24] Agarwal S, Furukawa Y, Snavely N, et al. Building rome in a day[J]. Communications of the ACM, 2011, 54(10): 105-112.
- [25] Wu C. Towards linear-time incremental structure from motion[C] 3DTV-Conference, 2013 International Conference on. IEEE, 2013: 127-134.
- [26] Wu C, Agarwal S, Curless B, et al. Multicore bundle adjustment[C] Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 2011 IEEE Conference on. IEEE, 2011: 3057-3064.
- [27] Xia W, Hongmei T, Yang Y等. Study on Road Extraction Method in Remote Sensing Image[A]. 2012 International Conference on Industrial Control and Electronics Engineering (ICICEE)[C]. 2012: 1578 – 1580.
- [28] 汪夕明, 遥感影像道路提取方法研究与实现[D], 北京, 清华大学, 2011.
- [29] 魏宇峰. 高分辨率遥感影像道路信息提取关键技术研究与实现[D]. 北京理工大学, 2010.
- [30] Lin Y, Saripalli S. Road detection from aerial imagery[C] IEEE International Conference on Robotics and Automation. IEEE, 2012:3588-3593.
- [31] Wegner J D, Montoya-Zegarra J A, Schindler K. A Higher-Order CRF Model for Road Network

- Extraction[C] Computer Vision and Pattern Recognition. IEEE, 2013:1698-1705.
- [32] Mattyus G, Wang S, Fidler S, et al. HD Maps: Fine-Grained Road Segmentation by Parsing Ground and Aerial Images[C] Computer Vision and Pattern Recognition. IEEE, 2016:3611-3619.
- [33] Lowe D G, Lowe D G. Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints[J]. International Journal of Computer Vision, 2004, 60(2):91-110.
- [34] Bay H, Ess A, Tuytelaars T, et al. Speeded-Up Robust Features (SURF)[J]. Computer Vision & Image Understanding, 2008, 110(3):346-359.
- [35] Rublee E, Rabaud V, Konolige K, et al. ORB: An efficient alternative to SIFT or SURF[C] IEEE International Conference on Computer Vision. IEEE, 2012:2564-2571.
- [36] 高翔, 张涛等, 视觉SLAM十四讲: 从理论到实践[B] 电子工业出版社, 2017-3:138
- [37] Rosten E, Drummond T. Machine learning for high-speed corner detection[J]. Computer Vision - ECCV 2006, 2006: 430-443.
- [38] Harris C, Stephens M. A combined corner and edge detector[C] Alvey vision conference. 1988, 15(50): 10.5244.
- [39] Lindeberg, T.: Feature detection with automatic scale selection. Int. J. Comput. Vis. 30(2), 79 – 116 (1998)
- [40] Lowe D G. Object Recognition from Local Scale-Invariant Features[C] iccv. IEEE Computer Society, 1999:1150.
- [41] Multiple View Geometry in Computer Vision Second Edition, Richard Hartley and Andrew Zisserman, Cambridge University Press, March 2004:105
- [42] Hartley R, Zisserman A. Multiple view geometry in computer vision[J]. Kybernetes, 2003, 30(9/10):1865 - 1872.
- [43] P. S. Heckbert and M. Garl, “Survey of polygonal surface simplification algorithms,” 1997.
- [44] C.-H. Choi, J.-B. Song, W. Chung, and M. Kim, Topological map building based on thinning and its application to localization, in Intelligent Robots and Systems, 2002. IEEE/RSJ International Conference on, vol. 1. IEEE, 2002, pp. 552 – 557.
- [45] Shen S. Accurate multiple view 3D reconstruction using patch-based stereo for large-scale scenes.[J]. IEEE Transactions on Image Processing A Publication of the IEEE Signal Processing Society, 2013, 22(5):1901.

- [46] Furukawa Y, Ponce J. Accurate, Dense, and Robust Multiview Stereopsis[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence, 2010, 32(8):1362-1376.
- [47] Bleyer M, Rhemann C, Rother C. PatchMatch Stereo - Stereo Matching with Slanted Support Windows[C] British Machine Vision Conference. 2011:14.1-14.11.
- [48] 吴福朝. 计算机视觉中的数学方法[M]. 科学出版社, 2008.
- [49] Turner D, Lucieer A, Watson C. An Automated Technique for Generating Georectified Mosaics from Ultra-High Resolution Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Imagery, Based on Structure from Motion (SfM) Point Clouds[J]. Remote Sensing, 2012, 4(5):1392-1410.
- [50] Kneip L, Furgale P. OpenGV: A unified and generalized approach to real-time calibrated geometric vision[C] IEEE International Conference on Robotics and Automation. IEEE, 2014:1-8.

攻读硕士学位期间发表论文与研究成果清单

学术论文

- [1] UAV-aided Large-scale Map Building and Road Extraction for UGV[C]. Cyber Technology in Automation, Control and Intelligent Systems (CYBER), 2017 IEEE 7rd Annual International Conference on. IEEE, 2017.
- [2] A loosely coupled MEMS-SINS/GNSS integrated system for land vehicle navigation in urban areas[C] Vehicular Electronics and Safety (ICVES), 2017 IEEE International Conference on. IEEE, 2017: 103-108.
- [3] 无人地面车辆车道级别引导方法[J].西安电子科技大学学报, 2017.
- [4] 一种车辆模型辅助的MEMS-SINS导航方法[J]. 中国惯性技术学报, 2017, 25(2):209-215.

发明专利

- [1] 一种适用无人驾驶车辆的双天线差分GNSS与里程计组合导航方法[P]. 201710556025.3
- [2] 一种无人车多源传感器信息仿真平台[P]. 201710739673.2
- [3] 一种基于MEMS的车辆模型辅助和约束的GNSS-INS组合导航方法[P]. 201610803759.2

项目经历

- [1] 国家自然基金委2016 “未来挑战赛”，代表北京理工大学“特立笃行”无人车队，获得第7名，担任地图组负责人
- [2] 陆军装备部“跨越险阻2016”地面无人系统挑战赛，代表北京理工大学“特立笃行”无人车队，获得初赛第3名、决赛第5名的成绩，担任地图组负责人
- [3] 国家自然科学基金面上项目：基于行驶空间的地面无人平台越野自主导航研究（项目批准号：61473042）

- [4] 国家自然科学基金面上项目：无人地面车辆行驶空间构建方法研究（项目批准号：61173076）
- [5] 北京高等学校青年英才计划：基于多传感器数据融合的地面无人平台感知与规划（项目批准号：YETP1215）
- [6] ****平台路径规划技术（总装十二五扩展项目）

致谢