

## 三维重建技术在城市测绘中的应用研究

## ——以某地区试验模型为例

陶春含 魏骊睿

重庆市勘测院

DOI:10.12238/gmsm.v5i6.1453

**[摘要]** 针对城市建设过程中的传统测绘操作复杂、效率低下、数据处理困难、测绘周期长等问题。文章以实验室模型模拟建设项目,模拟无人机飞行,研究三维重建技术在城市测绘中的应用,分析得大实时城市建设三维模型、点云数据和数据坐标等信息。研究表明,在城市测绘的应用中,三维重建技术效率高、数据处理快,有利于城市测绘工作的顺利开展。

**[关键词]** 无人机采集; 三维重建; 城市测绘

中图分类号: V279+.2 文献标识码: A

## Application of 3D Reconstruction Technology in Urban Surveying and Mapping

## —A Case Study of an Experimental Model of a Region

Chunhan Tao Lirui Wei

Chongqing Survey Institute

**[Abstract]** In the process of urban construction, traditional surveying and mapping methods are complicated, inefficient, difficult to process data and long surveying and mapping cycle. In this paper, the laboratory model is used to simulate the construction project, simulate the flight of UAV, study the application of 3D reconstruction technology in urban construction, and analyze the real-time 3D model of urban construction, point cloud data, data coordinates and other information. The research shows that in the application of urban surveying and mapping, 3D reconstruction technology has high efficiency and fast data processing, which is conducive to the smooth development of urban surveying and mapping.

**[Key words]** UAV acquisition; three-dimensional reconstruction; urban surveying and mapping

## 引言

随着社会经济的进步,城市化进程不断发展,地理空间信息也变得越来越复杂<sup>[1]</sup>。同时随着信息技术的飞速发展,使得日常城市测绘三维空间数据更加真实和立体<sup>[2]</sup>。城市测绘往往对测绘精度要求高、测绘周期长、测绘数据处理复杂等问题。特别是在大型工程建设期,现场变化快,测绘难度高。传统的测绘方法需要大量的人力和物力,利用水准仪、全站仪和移动基站等设备,然而这种测绘方式工作效率低,数据处理周期长,且对实时变化应对困难。随着现代化技术的发展和城市测绘工作困难的问题,无人机飞行测量、三维模型重建和点云数据获取更加广泛的应用到城市测绘当中。其具有高效率、低成本、操作简单和数据精确等多个优点<sup>[3]</sup>。本文利用实验室场地,模拟无人机飞行和城市建设测绘,验证无人机在城市测绘中应用的可行性和数据成果应用价值。

## 1 三维重建理论分析

本文采用基于多视图几何的方法作为场景建筑物三维重建的基本结构。具体流程如图1-1所示。

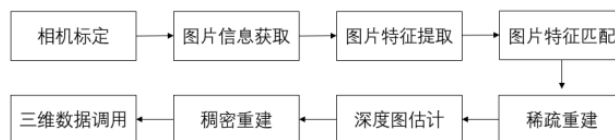


图1-1 三维重建在测绘建筑的工作流程

## 1.1 相机标定

## 1.1.1 相机模型

相机数据采集是三维重建的基础。根据相机成像原理分析,图像成像是由相机坐标系、像素坐标系、归一化坐标系和世界坐标系四种坐标系之间相互转换。根据其投影关系

分析可得到坐标系之间的转换关系如式1.1。其中点P世界坐标系坐标与其像素坐标间的投影变换关系,其中R, t为相机的外参数矩阵。图1-2展示了点P的四种坐标系以及其投影几何关系<sup>[4]</sup>。

$$ZP_{uv} = Z \begin{pmatrix} u \\ v \\ 1 \end{pmatrix} = K(RP_w + t) = KTP_w \quad (1.1)$$

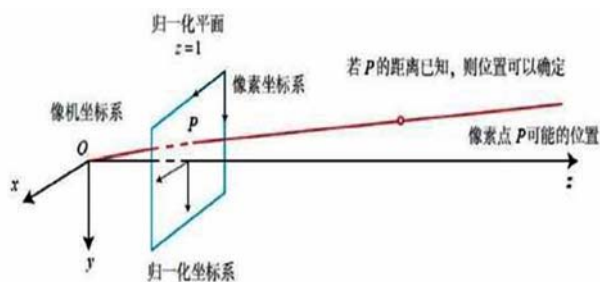


图1-2 坐标关系图

### 1.1.2 相机标定

由于采集数据时的外界因素和凸透镜自身性质,相机在数据采集时候会发生相机失真。根据原理分析可分为径向畸变和切向畸变,如图1-2所示。失真可理解为坐标点到成像点之间的距离发生了改变。因此需要对相机进行标定处理。通常使用的方法是利用标定棋盘对相机进行标定处理,从而得到相机各项参数。常用的相机标定技术有张正友相机标定法。



图1-3 相机失真类型

### 1.2 特征提取与特征匹配

图像特征提取可以视为广义上的图像变换,即将图像从原始属性空间转化到特征属性空间。本文使用SIFT尺度不变特征转换算法<sup>[4]</sup>,用来侦测与描述影像中的局部性特征,它在空间尺度中寻找极值点,并提取出其位置、尺度、旋转不变量,用于图像的特征点提取和特征匹配。SIFT算法的实质是在不同的尺度空间上查找关键点(特征点),并计算出关键点的方向。SIFT所查找到的关键点是一些十分突出,不会因光照、仿射变换和噪音等因素而变化的点,如角点、边缘点、暗区的亮点及亮区的暗点等。

#### 1.2.1 关键点检测

高斯核是唯一可以产生多尺度空间的核,一个图像的尺度空间定义为原始图像与一个可变尺度的2维高斯函数卷积运算。如下所示。

$$G(x_i, y_i, \sigma) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp\left(-\frac{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (1.2)$$

$$L(x, y, \sigma) = G(x, y, \sigma) * I(x, y) \quad (1.3)$$

引入高斯差分金字塔(DOG)函数,简化计算,对极值点进行检测。如下所示。

$$D(x, y, \sigma) = [G(x, y, k\sigma) - G(x, y, \sigma)] * I(x, y) \\ = L(x, y, k\sigma) - L(x, y, \sigma) \quad (1.4)$$

检测点和他同尺度的8个相邻点和上下相邻尺度对应的9\*2个共26个点比较,从而检测到极值点。

#### 1.2.2 关键点方向分配

对于在DOG金字塔中检测出的关键点,采集其所在高斯金字塔图像3σ领域窗口内像素的梯度和方向分布特征。梯度的模值和方向如下。

$$m(x, y) = \sqrt{(L(x+1, y) - L(x-1, y))^2 + (L(x, y+1) - L(x, y-1))^2} \quad (1.5)$$

$$\theta(x, y) = \tan^{-1}((L(x, y+1) - L(x, y-1)) / (L(x+1, y) - L(x-1, y))) \quad (1.6)$$

利用梯度直方图确定关键点的方向,方向直方图的峰值则代表了该特征点处邻域梯度的方向,以直方图中最大值作为该关键点的主方向。为了增强匹配的鲁棒性,只保留峰值大于主方向峰值80%的方向作为该关键点的辅方向。

#### 1.2.3 特征点描述

通过计算描述子所需的区域(4\*4),再将坐标旋转至关键点的方向,以确保旋转不变性,将邻域内的采样点分配到对应的子区域内,将子区域内的梯度值分配到8个方向上,计算其权值。再插值计算每个种子点八个方向的梯度,统计的4\*4\*8=128个梯度信息即为该关键点的特征向量。生成4\*4\*8=128维的特征点向量。

#### 1.3 稀疏重建

本文采用从增量式SFM<sup>[6]</sup>的方法进行稀疏重建。首先进行利用对应搜索:利用SIFT算法对所有图像进行特征提取,然后使用提取的特征点描述子进行匹配;匹配完成后,还需要使用对极几何关系对每个匹配图像对里的匹配点进行精化,因为通常会存在很多误匹配点对。然后进行增量重建:寻找一对初始的匹配图像对,选定匹配对后利用对极几何关系分解获得两张图像的位姿,然后三角化生成三维点。接下来,每次往算法中增加一张新的图像,通过PnP(Perspective-n-Point)估计它的位姿,然后三角化生成新的三维点,之后进行BA优化,BA过程中滤除外点。直至所有图像都被加入算法中。

#### 1.3.1 三角测量

三角测量用于已知已知相机内外参数和同一个三维点对

应多个视角像平面上的同名点坐标,恢复三维点的坐标。如下1-4所示。

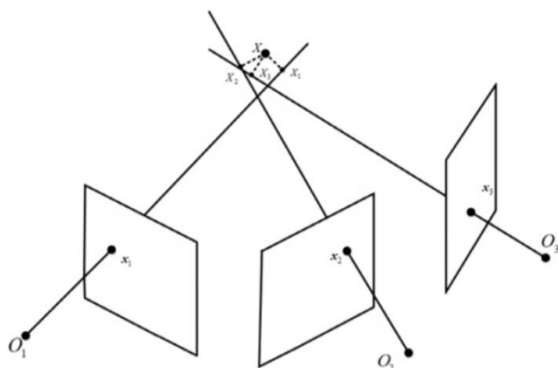


图1-4 三角测量示意图

通常已知第*i*个相机的投影矩阵 $P_i$ 和*K*个相机的内外参数(标定测得),再根据投影方程和坐标转换,通常采用最小二乘法或者Ransac结合最小二乘法求解 $X$ 的坐标。如公式1.7和1.8所示。

$$AX = 0 \quad (1.7)$$

$$A = \begin{bmatrix} x_1 P_{13} - P_{11} \\ y_1 P_{13} - P_{12} \\ \dots \\ x_i P_{i3} - P_{i1} \\ y_i P_{i3} - P_{i2} \\ \dots \\ x_N P_{N3} - P_{N1} \\ y_N P_{N3} - P_{N2} \end{bmatrix}, \quad N \geq 2 \quad (1.8)$$

### 1.3.2 非线性优化

捆绑调整是同时对三维点坐标和相机参数进行非线性优化,优化的目标是使得投影的点和观察点的误差越小越好,使获得的三维坐标误差减小。需要对得到的坐标数据进行优化,对应的优化问题是一个无约束的非线性最小优化的问题。优化问题描述如公式1.9所示。

$$g(\theta) = \frac{1}{2} \sum_i^n \sum_j^m x_{ij} \|\hat{u}_{ij} - u_{ij}(C_j, X_i)\|^2$$

$$= \frac{1}{2} \sum_i^n \sum_j^m x_{ij} e_{ij}, \quad \theta = (C_1, \dots, C_m, X_1, \dots, X_n) \quad (1.9)$$

其中 $\hat{u}_{ij}$ 代表观测点, $u_{ij}$ 代表投影点表示, $X_i$ 代表三维坐标,

$C_j$ 代表相机参数, $x_{ij}=1$ 表示第*i*个点可在第*j*个相机中可

见, $\theta \in \mathbb{R}^{9m+3n}$ 高位空间的非线性优化。

### 1.4 稠密重建

稠密点云重建<sup>[7]</sup>的目的是在相机位姿已知的前提下,逐像素的计算图像中每一个像素点对应的三维点,得到场景物体表面密集的三维点云输入多帧同一场景不同视角RGB图像,选取其中一帧或几帧图像作为参考图像,利用输入的多帧图像恢复参考图像的深度和法向量信息,获得参考图像的深度图和法向量图。最后对恢复的参考图像进行融合,具体步骤如图1-6所示。



图1-5 稠密重建步骤

首先进行种子点选取,从获得的3D点云中,筛选出那些可以投影到参考图像上的3D点;其次进行种子点深度与法向量信息恢复,将3D点投影到参考图像上,以3D点到参考图像相机坐标系原点的距离为投影像素初始深度,3D点到相机坐标系原点的方向为初始法向量。优化像素点的深度与法向量信息使得在参考图像上的模板与在其他视图上的模板投影差异尽可能小;然后进行其余像素点深度与法向量信息恢复,计算种子点优化后结果的置信度,按照置信度高低建立队列,对队列中的点进行优化;最后进行三维稠密点云重建,根据深度图每个像素的深度,利用相机的逆投影矩阵可以将深度像素点投影到三维空间,获得3D点云。

## 2 图像三维重建试验分析

为减小试验经费开销,依靠试验室搭建模型进行城市模拟三维重建测量。利用手持手机模拟无人机飞行,本实验采用I7-8700K,显卡1050Ti。试验场地规划设计两种尺寸共计7栋修建建筑物,如图1-6所示。



图1-6 实验室模型

### 2.1 采集相机标定

本实验在三维重建数据采集前,对采集设备进行相机标定,利用相机采集标准标定板图片。再利用工具MATLAB自带相机标定程序对相机内外参数进行标定,为后续试验提供相机参数,且标定参数在误差范围内,可以使用该数据。

## 2.2 模型三维场景建立及分析

通过采集的图片数据,利用工作站对图片进行特征提取、特征匹配、稀疏重建和稠密重建获得现场模型三维模型和点云数据。利用不同的软件对其进行加工处理,生成DEM等不同三维产品,满足不同的应用需求。

本试验可提供现场模型三维点云数据,现场模型体积测量,现场模型空间信息等数据。因此城市建设中利用无人机飞行获取现场图片信息,对现场进行三维重建和点云信息获取,接入匹配现在实际高程数据,可对现场测绘作业提供巨大帮助。对工程规划设计、剖面分析、模型数据建立、BIM模型接入等后续工程提供有力帮助。

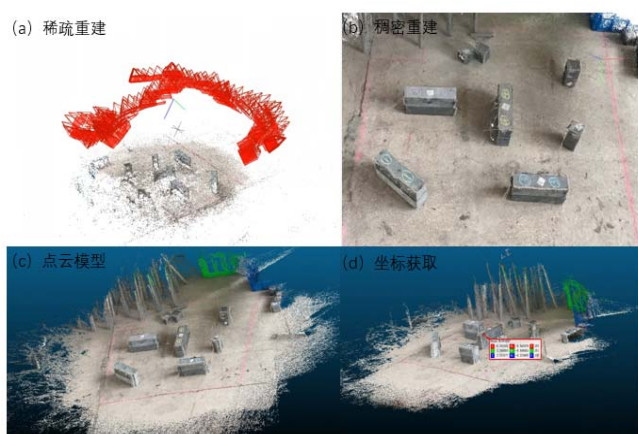


图1-7部分成果图

## 3 结论

模型试验证明,针对城市测绘现场环境复杂、建筑物高程

高、体积大等特点,利用视频的非接触式信息收集,进行城市模型三维重建和点云数据获取,将其应用在城市测绘中,结合实际高程,可以产生出多种多样的测绘成果,满足于城市日常快速测绘的需求。后续可利用无人机和性能良好的工作站进行现场试验,验证城市测绘现场三维重建的实用性。

### [参考文献]

- [1]范媛,范宏,吴建国,等.无人机影像识别白喉乌头的相对高程阈值法适用性分析[J].测绘通报,2022,(02):131-135.
- [2]冯亚飞,陈云波,张河坤,等.三维点云数据在历史建筑结构分析和尺寸量测中的应用[J].地矿测绘,2015,31(02):4-8.
- [3]肖苏勇.无地面控制点无人机影像空三定位精度分析[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2021,40(06):117-123.
- [4]徐牧遥,李少波,蔡俊东.基于ROS系统的相机标定研究[J].自动化应用,2021,(06):80-83.
- [5]刘九庆,项前,王宇航.基于SIFT算法和改进的RANSAC算法对森林火灾的图像识别与试验研究[J].森林工程,2022,38(06):96-103.
- [6]李美燕.增量式SfM方法在航拍图像三维重建中的应用[J].中国科技信息,2023,690(01):36-38.
- [7]陈相帅.基于MVS倾斜摄影测量技术的城市三维模型研究[J].能源与环保,2018,40(07):136-141.

### 作者简介:

陶春含(1996--),男,汉族,重庆丰都人,学士,助理工程师,从事工程测绘。

魏骊睿(1994--),女,汉族,重庆丰都人,硕士,从事实景三维地理信息系统研发。