DOI:10.11918/j.issn.0367-6234.201903176

积雪深度3D识别与数字摄影测量

张清文[1,2], 刘盟盟[1,2], 汤 文[1,2], 范 峰[1,2]

(1.结构工程灾变与控制教育部重点实验室(哈尔滨工业大学), 哈尔滨 150090;
2.土木工程智能防灾减灾工业和信息化部重点实验室(哈尔滨工业大学), 哈尔滨 150090)

摘 要: 为解决传统积雪深度测量方法投入大、耗时长、效率低等问题,基于SfM(structure from motion)技术提出一种无接触式的高精度摄影测量技术,应用风雪联合试验系统针对不同模型进行风雪联合试验,利用相机获取积雪分布照片,还原雪面的三维坐标并利用MATLAB编程提取雪面的空间分布数据,与钢尺实测数据对比来评价该测量方法的精度. 对比结果表明:利用摄影测量法对简单形式屋面进行测量时,能将绝对误差控制在±2 mm,相对误差在1%以内;测量复杂屋面时,绝对误差可控制在±4 mm,相对误差约为3%,测量精度满足模型试验测量要求,且利用摄影测量技术对复杂屋面积雪分布测量工作效率有显著提高.

关键词: 积雪深度;SfM技术;3D还原;模型试验;误差分析

中图分类号: TU312+.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2019)12-0194-07

3D identification and digital photogrammetry of snow depths

ZHANG Qingwen[1,2], LIU Mengmeng[1,2], TANG Wen[1,2], FAN Feng[1,2]

(1. Key Lab of Structures Dynamic Behavior and Control (Harbin Institute of Technology), Ministry of Education, Harbin 150090, China; 2. Key Lab of Smart Prevention and Mitigation of Civil Engineering Disasters (Harbin Institute of Technology), Ministry of Industry and Information Technology, Harbin 150090, China)

Abstract: To solve the problems of traditional snow depth measurement methods, such as large investment, time consuming, and low efficiency, a contactless method named Photogrammetry was proposed based on SfM (structure from motion). First, a series of experiments were conducted using the wind-snow combined experiment facility, and snow distribution photos were obtained by camera. Then, the three-dimensional coordinates of the snow surface were restored, and the spatial distribution data of the snow surface was extracted by MATLAB programming, which was compared with the snow depths that were measured by steel ruler to verify the accuracy of the method. The results showed that the accuracy was kept at ±2 mm and the relative error was within 1% when using photogrammetry for simple roofs. While when using photogrammetry for complex roofs, the accuracy was ±4 mm and the relative error was within 1%. It was proved that the accuracy of the photogrammetry method satisfied the measurement requirements of the tested model and the efficiency could be greatly improved when using photogrammetry for measuring snow depth distribution on complex test model roofs.

Keywords: snow depth; SfM technique; 3D identification; scaled experiments; error analysis

大跨度屋盖结构是对雪荷载较为敏感的结构,准确测量屋面积雪空间分布对于大跨度屋盖设计有重要意义. 描述屋盖风致雪漂移的不均匀分布需要的测点数量众多,但目前普遍积雪厚度测量方法是通过钢尺或者雪探头插入雪中进行直接测量. 此类测量方法虽然能较为容易地保证较高的测量精度,但是每次测量只能获取一个点的数据,这对于大面积屋盖的积雪分布测量无疑是非常耗时耗力的;同时此类方法在测量一些无法上人屋盖的积雪分布时无法应用,且在测量过程中由于需要人为将钢尺或探头插入雪中,将不可避免地对雪面造成不同程度的破坏. 此外,若屋盖的形式非常复杂或雪面下部有覆冰层时,基于钢尺或雪探头的测量结果极易产生较大误差.

部分学者利用卫星遥感或LIDAR(激光探测与测量)对山区的积雪分布进行测量,主要目的是从水文角度进行考虑,研究积雪的分布以及预测积雪的体积,从而计算出雪水当量[1-2]. LIDAR技术能获取高精度的雪面三维数据,但是由于其运营成本较高,对于需要获取大量数据来进行统计分析的屋面雪荷载研究而言,长期运营的困难较大.

为改善上述情况并提高效率,部分国内外学者将近景数字摄影测量技术引入屋面积雪分布测量工

收稿日期: 2019-03-24
基金项目: 国家自然科学基金(51478147);
国家杰出青年科学基金(51525802)
作者简介: 张清文(1983—),男,博士,讲师;
范 峰(1971—),男,教授,博士生导师
通信作者: 张清文,zhangqw@hit.edu.cn

作. 投影几何学和摄影测量由 Sturms 和 Hauck 于 1883 年发明[3],1993 年 Cline 首次应用摄影还原技术对积雪深度进行了测量,但受限于当时的电子摄影技术,还原精度为 1 m[4],其还原精度并不适用于建筑屋面积雪分布测量;近年来,由于电子摄影技术的飞速发展,关于摄影测量技术在屋面积雪厚度测量领域应用的可行性研究逐渐增多,Sakuria 等[5-6]通过直升飞机利用摄影测量技术对屋面积雪进行了离散点的积雪厚度测量并把精度控制在了 30 ~ 40 mm;Takahiro 等[7]利用无人机对柱壳体育馆屋盖积雪分布进行了观测,并跟传统的雪筒测量结果进行了对比,平均误差为 90 mm,最大的误差达到 100 mm以上.

进入 21 世纪后,数字摄影测量工作站在中国的摄影测量生产中得到了普遍应用与推广,但是大多研究方向集中于大地测量和三维城市地图绘制,目前关于雪荷载的摄影测量研究资料与文献较少. 2008 年,晏克勤等[8]在同济大学风洞实验室里对高低跨平屋顶的试验积雪分布进行了近景摄影测量,并对近景测量部分对图像处理流程做了介绍,但是并没有定量的对整个方法精确度进行评价. 刘俊峰等[9]讨论了基于数字摄影测量的雪盖制图方法,但是局部误差达到了 10 m 以上,且平均误差都是以 m 为单位级,因此并不适用于建筑雪荷载的测量.

本文基于近景数字摄影测量技术,利用现代的、易于获取的设备和技术建立了一套用于测量屋盖积雪分布的方法,并通过一系列模型试验结果,将此方法与传统方法进行对比,对其可行性与精确度进行评估.

1　基于近景数字摄影测量的积雪分布测量方法的建立

1.1　数字摄影测量技术背景理论简介

SfM 是利用一系列有互相重叠部分的 2D 图片,通过识别特征点、匹配照片并估计相机运动位置还原出照片中的三维场景或物体的技术[10].

SfM 技术建立三维实体的过程可看做从一组二维图像中的特征点提取三维坐标的信息,并对比每张图片的特征点的变化,拼接、对齐不同图片中的三维点坐标,最后生成由 *XYZ* 三维坐标点组成点云. 整个过程可以用如下数学模型来表达.

如图 1 所示,为还原一个三维物体,围绕整个物体一共拍摄了 m 张照片,空间中一共有 n 个点,建立方程:

$$\boldsymbol{x}_{i,j} = \boldsymbol{P}_i \boldsymbol{X}_j,\ i = 1,\cdots,m;\ j = 1,\cdots,n. \qquad (1)$$

式中:$\boldsymbol{x}_{i,j}$ 为空间中第 j 个点在第 i 幅照片中的二维坐标信息,$\boldsymbol{P}_i$ 则对应为第 i 幅照片中的投影矩阵,$\boldsymbol{X}_j$ 为空间中第 j 个点的三维坐标. 还原问题相当于已知 $m \times n$ 个二维坐标信息,求解 m 个投影矩阵和 n 个空间中点的三维坐标. SfM 算法将利用真实空间坐标系和相机坐标系之间的旋转矩阵 $\boldsymbol{R}$,平移矩阵 $\boldsymbol{T}$ 和相机拍照时的焦距 f 这几个参数来求出真实空间坐标系下 n 个点的三维坐标,最终生成点云.

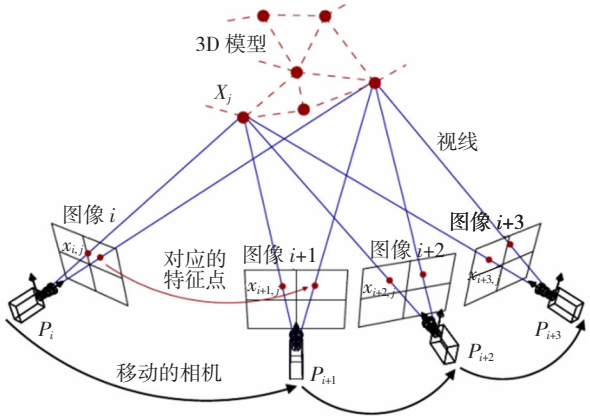


图 1　SfM 概念示意

Fig. 1　Conceptual diagram of SfM

目前已有种类繁多而且功能完整的基于 SfM 算法的 3D 还原软件,本文将利用既有的 3D 还原软件进行拍摄物体的还原,不针对 SfM 算法进行编译研究.

1.2　缩尺试验介绍

由于测量条件限制,实际建筑屋面的积雪分布数据较难获取. 为了有效地验证数字摄影测量技术的可行性以及精确度,依托哈尔滨工业大学风雪联合实验室,采用便于用钢尺测量得到雪深的屋盖缩尺模型进行模型试验. 哈尔滨工业大学风雪联合实验室基于风雪联合试验系统,可用于研究风致雪漂移的机理、典型屋盖结构的雪荷载分布规律、各种类型大跨度屋盖结构的雪荷载分布预测[11-12].

为验证数字摄影测量应用于不同测量情况下的精确度,试验设置了不同工况下不同形式的屋盖模型作为试验研究对象. 根据不同的试验目的,进行了具有代表性的 4 组试验,工况信息见表 1.

1.3　积雪分布 3D 重建及后处理

1.3.1　三维模型重建软件对比

目前已有众多基于 SfM 算法的软件可直接利用二维照片进行三维模型重建,例如 PhotoModeler、Photosynth、Autodesk 123D Catch、Bundler and PMVS2、MicMac、Autodesk Remake、OpenCV Visual SfM、Pix4D 以及 Agisoft PhotoScan. 这些软件允许用户自定义编辑的内容和对源文件的要求都不尽相同,许多国外学者已经对上述提到软件的还原效果进行过讨论[13-15]. 综合其讨论结果以及中国地区可以获取的还原软件,选取 Autodesk 123D Catch、Autodesk

Remake、OpenCV Visual SfM 以及 Agisoft PhotoScan 四款软件进行尝试. 表 2 给出了利用不同软件还原同一工况时的结果对比情况.

表 1 工况信息

Tab. 1 Condition information

模型	工况信息	实验目的
单曲下凹屋面	模型尺寸:2 m × 1 m × 0.2 m;模拟降雪量:60 mm	探索不同的雪面标志物对还原质量的影响,选取最佳的雪面标志物
带女儿墙平屋面	模型尺寸:2 m × 2 m × 0.5 m,女儿墙高 0.1 m;模拟降雪量:30 mm	验证测量较为复杂屋盖模型表面积雪分布时,摄影测量的精度
1m 立方体模型	模型尺寸:1 m × 1 m × 1 m;模拟降雪量:30 mm	验证测量较大范围的不均匀积雪分布时,摄影测量的精度
双坡屋面模型	模型尺寸:2 m × 2 m × 0.5 m,屋面坡度 30°;模拟降雪量:30 mm	验证测量自遮挡较多的模型屋面积雪分布时,摄影测量的精度

表 2 同一工况不同软件还原情况对比

Tab. 2 Comparison of reduction performance of different software

软件名称	还原质量	流程耗时/min	解算方式	可行性与局限
Autodesk Remake	较好	30	在线、本地	目前只能使用中等质量还原,且有 250 张图片数量限制
Autodesk 123D Catch	一般	12	在线	无法选择还原的质量,且有 50 张图片数量限制
Agisoft PhotoScan	最好	15	本地	还原质量和各项参数都能够自定义,还原质量非常高
OpenCV Visual SfM	差	5	本地	解算速度快但还原出的点云稀疏,细节得不到很好的体现

从表 2 可看出,Agisoft PhotoScan 是四款软件中综合表现最好的三维重建软件. 除了上述工况,为了检验还原软件对不同物体和场景的还原能力和稳定性,还对其他工况进行了还原尝试. 在多次尝试中发现 Autodesk 123D Catch 的服务器存在不稳定的现象,经常无法上传图片;OpenCV Visual SfM 在还原多张照片时常常会出现无法找到初始配对图片的错误,解算效果同样十分不稳定;Autodesk Remake 对于拍摄距离较远的物体,会发生不能正确识别物体的现象. 因此最终确定,SfM 还原部分将利用 Agisoft PhotoScan 完成.

1.3.2 基于 SfM 的雪面三维重建与后处理

PhotoScan 软件包含了所有生成模型所需的算法和步骤,集成了从照片的导入到三角网格建立与 3D 点云生成的整体流程.

利用 PhotoScan 进行解算之前,需将图片利用蒙版功能除去一些无用的背景信息. 这样处理的原因有两点:一是能较大提升进行照片对齐流程效率,因为被蒙版约束的区域将不进行特征点检测,同时在计算相机空间位置的时候也不会被考虑进去;二是可将一些对图片有干扰的信息去掉,提高还原的准确度.

之后首先执行 SITF 算法,形成以物体边缘为主的粗略描述物体空间位置的稀疏点云[16]. 然后人工剔除稀疏点云中模型边缘的离散点,以减少密集点云重建过程中杂点出现的数量,从而保证模型的平滑. 在对稀疏点云进行编辑之后,进行密集点云的建立. PhotoScan 将会对每张图片进行分析,提取出图片中二维点的深度信息,根据每一幅照片的信息和之前建立的稀疏点云对点云进行加密.

通过 PhotoScan 生成的密集点云需要将原始的各点 XYZ 三维坐标输出,需要注意的是由于 PhotoScan 是在程序内置的本地坐标系统下生成的模型,导致生成的模型产生整体旋转和偏移,需要通过欧拉旋转矩阵对模型进行纠正,具体计算方法及公式(由 $O'-x'y'z'$ 平面转至 $O-xyz$ 平面)[17]:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \boldsymbol{R}(\psi,\theta,\varphi)\lambda\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix}\begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \end{bmatrix}, \tag{2}$$

$$\boldsymbol{R}(\psi,\theta,\varphi) = \boldsymbol{Z}'(\varphi)\boldsymbol{N}(\theta)\boldsymbol{Z}(\psi), \tag{3}$$

$$\boldsymbol{Z}'(\varphi) = \begin{bmatrix} \cos\varphi & \sin\varphi & 0 \\ -\sin\varphi & \cos\varphi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \tag{4}$$

$$\boldsymbol{N}(\theta) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta & \sin\theta \\ 0 & -\sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix}, \tag{5}$$

$$\boldsymbol{Z}(\psi) = \begin{bmatrix} \cos\psi & \sin\psi & 0 \\ -\sin\psi & \cos\psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \tag{6}$$

式中:ψ 为进动角,θ 为章动角,φ 自转角,具体定义见图 2,Δx、Δy、Δz 分别为原点 O 沿 Ox 轴,Oy 轴,Oz 轴三个方向的偏移量,$\boldsymbol{R}$、$\boldsymbol{Z}'$、$\boldsymbol{N}$、$\boldsymbol{Z}$ 均为坐标旋转矩阵,相互关系在式(2) ~ (6) 中给出,λ 为缩尺比.

在进行坐标转换时,地图配准(坐标原点匹配)应同步进行. 在拍照之前在模型上利用记号笔标定原点(0,0,0),同时在其他部位也需要做 3 ~ 5 处标记,并确保这些记号点不会被积雪覆盖. 测量其他参考点到(0,0,0)的距离和角度,换算成三维坐标点并记录,此自定义的坐标系称之为测量坐标系. 进行

3D 还原后,需要在 PhotoScan 软件中的可视化窗口找到这些标记点,并导出这些标记点的在软件坐标系中的原始坐标,计算这些点之间的距离并跟实际测量所得的距离相除,得出点云的缩尺比. 再利用式(2)~(6)反算出旋转矩阵 $\boldsymbol{R}$、$\boldsymbol{Z}'$、$\boldsymbol{N}$、$\boldsymbol{Z}$ 和偏移量 ,再将求得的矩阵和偏移量代回式(2)中处理剩余的点云坐标. 处理原始点云的过程相当于把实体模型在测量坐标系下数字化,整个过程利用 MATLAB 实现.

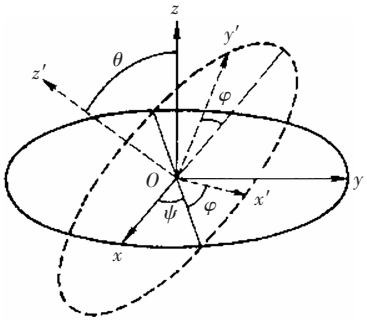


图 2　欧拉角示意

Fig. 2　Diagram of Euler angle

通过对点云数据进行后处理,可得到每个点的高程信息. 对于雪深信息的获取,需要知道模型 xOy 平面上某一点有雪和无雪两种工况的高程信息并将两者做差得出雪深数据,这就需要将两个模型进行配准. 由于两个不同模型生成的点云的坐标不可能完全一样,导致对应到实体模型同一个点时坐标值可能会产生 0.01 mm 甚至更大的误差(假设生成点时最小分辨率为 0.01 mm),这就需要进行点云的配准以及标准化处理,进行一一对应的 z 坐标相减并把差值映射到 xOy 平面,从而给出空间分布.

配准的思路有两种,一种是记录有雪模型的点云的每一个点对应的 x_1y_1 坐标,并设置坐标值的浮动范围,形成以 x_1y_1 坐标为圆心的小圆,使得在无雪模型点云上能匹配到一个或者多个点来对应有雪模型上的点. 之后计算有雪模型上点的 z 坐标与无雪模型上点的 z 坐标差值(多个点的时候取平均值),并将 z 的差值返回到对应的 x_1y_1 坐标,计算出对应点雪深. 图 3 以流程图的形式展示了第一种配准方法的思路.

另外一种配准方法是通过空间插值的办法将所有的点云对应到一个 1 500 × 1 500 的网格上,每个网格上的点都记录着通过空间插值得出的 z 坐标. 之后再将两个网格相减便可得出雪深数据. 网格的数量可以根据数字模型所需的分辨率进行调整,不一定是 1 500 × 1 500 的网格.

尽管许多学者针对第一种方法提出了改进版方法如 ICP 算法,K - D 树检索法等[18-20],但由于此方法需要大量的运算循环语句,且模型点云的数量均为百万级以上,因此导致其运算效率低下. 第二种点云配准方法更简单且能保证较好的精确度,本文后处理流程也是采用第二种配准方法.

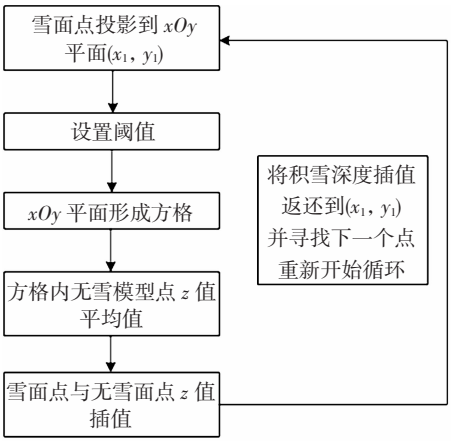


图 3　领域搜索法配准思路

Fig. 3　Registration method of domain search

2　数字摄影测量方法精度分析

2.1　图像获取要求

由于 SfM 工作流程十分依赖图片质量的好坏,因此图片获取在数字摄影测量中非常重要,通过初期试验的经验发现,为了保证还原的质量,采集图像的过程需要注意以下几点:

1)以一点为圆心,转动拍摄,一般每 25°角拍摄一张照片,复杂物体需每间隔 10°,相邻两张图片之间应保证约 60% 的重合度. 对于自遮蔽比较多的建筑模型,应该分块拍摄与还原.

2)拍摄顺序不一定要以物体为圆心进行拍摄,也可以以其他的行进路线进行拍摄,但拍摄路线和拍摄顺序应该遵循一定的规则,而且每张照片之间都要具有连贯性. 两张连贯的图片沿行进方向需要有 80% 的重叠,行进方向的侧向应有 60% 的重叠.

3)照片的质量(像素、锐度等)和对焦好坏对还原也有很大的影响,好的照片能提升每张图片的有效识别点数量从而保证还原的准确度. 拍摄时应该注意照片是否失焦,发现失焦的图片应及时删除并进行补拍.

4)拍照的过程中往往会遇到光照不足的情况,这种情况会造成每一张图片的光源都不同,会使 SfM 流程在计算每张照片的像素点深度时出现偏差导致相片对齐质量下降,推荐利用固定的人工光源对物体进行补光或者适当调高 ISO 值.

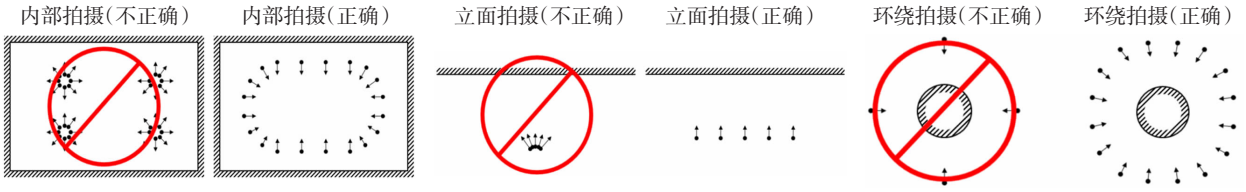
5)当需要把一个整体物体拆成几个小部分进行拍摄的时候要注意,不同部分的相似度是否比较高,如果相似程度比较高,也会导致还原失效,如拍摄窗户非常多且形式重复的住宅立面,这时需要在

物体上添加标识物来区别.

图 4 描述了 3 种错误拍摄方式以及对应的正确拍摄方式.

特别需要注意的是,对于积雪面这类纯色且反光率比较高的物体,需要添加额外的标志物来提升物体还原的完整度. 为了研究不同雪面标志物对雪面还原的影响,在保证其他工况条件相同的情况下对单曲下凹屋面积雪进行了不同标志物设置并讨论了还原效果. 图 5(a)为没有设置标志物的雪面,图 5(b)为设置了 3 条亮橙色荧光线的雪面,图 5(c)为播撒黑色碳粉的雪面,还原和对比结果见图 6.

从还原的结果可以看出,没有标志物的雪面还原质量比较差,有将近一半的雪面数据丢失;设置了 3 条荧光线的雪面上红圈所示区域的雪面数据丢失而且还原的雪面的纹理比较差;撒粉雪面的还原效果比较好,与真实雪面更为接近,且纹理还原度也较好. 因此在所有的试验中,都采用播撒黑色碳粉方式对雪面进行拍摄前处理.



(a) 内部拍摄时的拍摄顺序 (b) 立面拍摄时的拍摄顺序 (c) 环绕拍摄时的拍摄顺序

图 4 拍摄时的拍摄顺序(左侧为错误示范,右侧为正确示范)

Fig. 4 Shooting sequence (Left: the error demonstration; Right: the correct demonstration)

(a) 雪面未处理 (b) 雪面设置 3 条荧光线 (c) 雪面播撒黑色碳粉

图 5 雪面标志物设定

Fig. 5 Markers setting on the snow face

(a) 雪面未处理 (b) 雪面设置 3 条荧光线 (c) 雪面播撒黑色碳粉

图 6 设置不同标志物的雪面还原效果

Fig. 6 Effect on reduction of snow face when using different markers

2.2 带女儿墙平屋顶模型

本文针对带女儿墙平屋面模型积雪分布、立方体周围积雪分布以及带天窗、档雪板的双坡模型屋面积雪分布均进行了摄影测量与钢尺实测的对比,但限于篇幅影响,本节仅以带女儿墙平屋面模型实验为例,详细介绍了摄影测量结果与钢尺实测结果的对比,并对摄影测量的误差与精度进行了分析. 不同模型的摄影测量还原结果与钢尺实测结果对比信息详见表 3.

带女儿墙平屋面积雪分布的钢尺测量和摄影测量结果对比见图 7,图 7(a)为积雪分布试验结果照片,进行实测与还原结果对比的测线在图中由红线标注,图 7(b)为利用摄影还原测量所得积雪分布密集点云. 图 7(c)给出了沿对比测线,钢尺测量与摄影测量所得积雪深度值对比结果,黑线为密集点云拟合出的雪深曲线,红色点为手测数据点,两种测量方法最大的误差为 2.30 mm. 为了解误差分布的情况,利用 Kolmogorov-Smirnov 方法检验误差分布是否符合正态分布,并在确定是正态分布的情况下给出了置信度为 95% 的误差区间. 图 8 给出了测量误差值出现频率. 图 9 给出了测量误差随位置分布的关系,从图 9 可发现,摄影测量误差的分布跟位置没有相关性,分布具有随机性. 由于女儿墙对光线具有

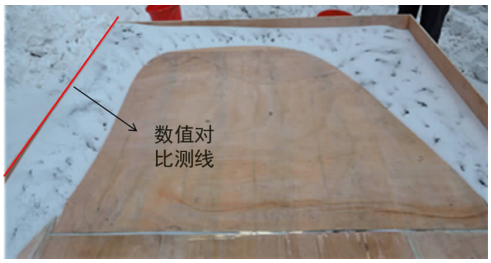
遮蔽效果,使雪面处于较暗的地方,使负误差的测量　　点数量多于正误差的测量点数量.

表 3　各模型测量结果对比

Tab. 3　Comparison of results of different models

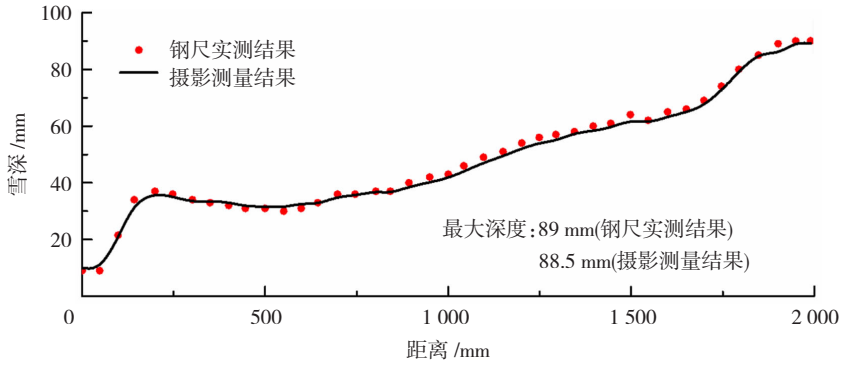
模型名称	照片数量	拍摄距离/m	点云密度/(点数/mm²)	95% 保证率的误差区间	平均雪深/mm	平均误差/mm
双坡屋面	43	2.5	3.14	[-1.24 mm, 1.30 mm]	22	0.22
带女儿墙平屋面	52	2.5	2.87	[-1.87 mm, 1.35 mm]	72	-0.61
立方体	236	3.0	7.95	[0.01 mm, 3.80 mm]	54	1.22

模型名称	相对误差/%	标准差/mm	图像分辨率/(mm/像素)	网格尺寸/(mm/网格)	各工况测点数量	光照情况	雪剖面拟合优度
双坡屋面	1.00	0.56	0.49	0.72	84	阴天	0.978
带女儿墙平屋面	-0.85	1.02	0.53	0.72	100	阴天	0.974
立方体	2.20	1.90	0.70	1.43	418	部分受阳光直射	0.988



(a) 带女儿墙平屋面积雪分布实际照片

(b) 带女儿墙平屋面积雪分布密集点云



(c) 钢尺测量与摄影测量所得积雪深度值对比

图 7　带女儿墙平屋面积雪分布的钢尺测量和摄影测量结果对比

Fig. 7　Comparison of results by ruler measurements and photogrammetry of snow distribution on a flat roof with parapet wall

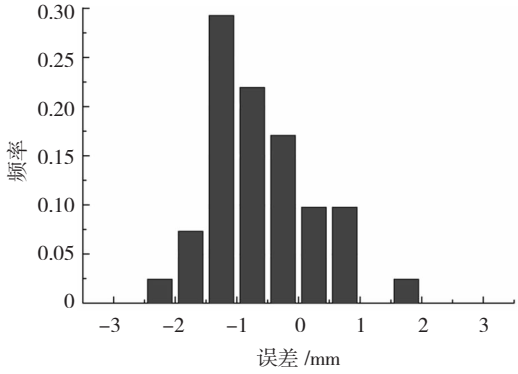


图 8　结果误差分析

Fig. 8　Error analysis of the results

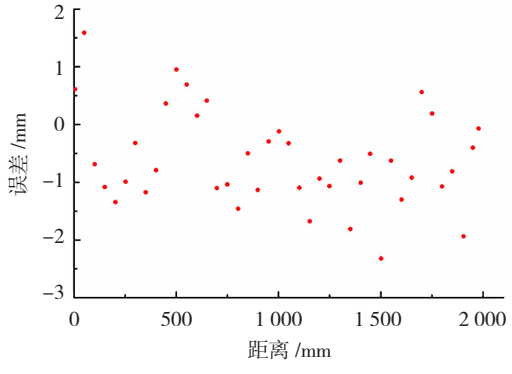


图 9　误差随位置分布关系

Fig. 9　Error distribution with position

2.3　不同模型还原精度

通过对比 3 种不同模型的钢尺测量与摄影测量结果,验证和评价了数字摄影测量的精确度. 发现利用数字摄影测量对简单模型进行测量时,绝对误差能控制在 ±2 mm,相对误差在 1% 以内;测量复杂物体时,绝对误差控制在 ±4 mm,相对误差约为 3%.

表 3 中的拍摄距离是指相机到模型中心点的距离;图像分辨率是指在每张照片中每个像素点代表的距离;网格尺寸指构成网格三角形的平均边长;测点数量指一个模型单一工况下全模型测点数量;雪剖面拟合优度的参考指标为 R^2.

3 结 论

传统积雪测量的方法一般是通过钢尺进行逐点手测,这种方法投入高、耗时长、效率低、危险性高,且测量的时候会对雪面造成破坏. 本文为解决传统测量方法的缺点,结合 SfM 技术提出了一种数据获取效率高、无接触的高精度摄影测量技术流程,并基于模型试验结果分析了摄影测量应用于积雪测量的可行性和精确度,得到的主要结论如下:

1) 通过不同还原软件的还原质量、解算速度与编辑自由度 3 个方面的评价,得出 Agisoft PhotoScan 为目前能获取还原软件中的最佳选择.

2) 摄影照片的质量对还原精度影响较大,本文制定了一套较为完善的用于雪荷载摄影测量的拍照采样要求,并通过实验对比发现进行拍照取样时,适当的雪面标志物会极大提高还原精确度.

3) 摄影测量技术对复杂屋面积雪分布测量的工作效率有显著提高,并且通过摄影测量结果与钢尺实测雪深数据对比,发现利用摄影测量法对简单屋面进行测量时,能将大部分误差控制在 ±2 mm,相对误差在 1% 以内;测量复杂物体时,绝对误差可控制在 ±4 mm,相对误差约为 3%,测量精度满足模型试验要求. 此外,考虑到建筑屋面积雪深度测量的实际情况,建议在实际工程测量中,测量误差应以相对误差形式进行规定.

参考文献

[1] BÜHLER Y, ADAMS M S, BOSCH R, et al. Mapping snow depth in alpine terrain with unmanned aerial systems (UAS): Potential and limitations[J]. The Cryosphere Discussions, 2016(10): 1077. DOI: 10.5194/tc-2015-220, 2016

[2] BERNARD E, FRIEDT J M, TOLLE F, et al. Monitoring seasonal snow dynamics using ground based high resolution photography[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2013(75): 93. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2012.11.001

[3] DOYLE F. The historical development of analytical photogrammetry [J]. Photogrammetric Engineering, 1964, 30(2): 261

[4] UCHIYAMA S, INOUE H, SUZUKI H. Approached for reconstructing a three-dimensional model by SfM to utilize and apply this model for research on natural disaster[J]. Research Report of Earth Science and Disaster Prevention, 2014, 81: 48

[5] SAKURAI S, JOH O, SHIBATA T. Survey of roof snow depth by aerial photogrammetry[C]//Proceedings of the Second International Conference on Snow Engineering. Baltimore: Loset & Norem (eds), 1993: 96

[6] SAKURAI S, JOH O, SHIBATA T. Aerial photogrammetry of roof snow depths using three different aircraft[C]//Proceedings of the Fourth International Conference on Snow Engineering. Hjorth-Hansen: Loset & Norem (eds), 2000: 83

[7] TAKAHIRO C, THOMAS T. Accuracy of snow depth measurements on roods measured with photogrammetry[C]//Proceedings of the 8th International Conference on Snow Engineering. Nantes: Snow Engineering VIII Organizing Committee, 2016: 340

[8] YAN Keqin, CHENG Tao. Close shot photogrammetry for measuring wind-drifted snow distribution on stepped flat roofs [C]// Proceedings of 2008 ISECS International Colloquium on Computing Communications. Qingdao: Control and Management, 2008: 333. DOI: 10.1109/CCCM.2008.273

[9] 刘俊峰,陈仁升,宋耀选,等. 基于数字摄影测量的雪盖制图方法探讨[J]. 冰川冻土,2012,34(3):619
LIU Junfeng, CHEN Rensheng, SONG Yaoxuan, et al. Discussion on snow cover mapping method based on digital photogrammetry [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2012, 34(3): 619

[10] SFM 原理简介[EB/OL]. (2018-09-05)[2019-03-05]. https://blog.csdn.net/lpj822/article/details/82716971

[11] LIU Mengmeng, ZHANG Qingwen, FAN Feng. Outdoors experiments of snowdrift on typical cubes based on axial flow fan matrix in Harbin[C]//Proceedings of 8th International conference on Snow Engineering. Nantes: Snow Engineering VIII Organizing Committee, 2016: 30

[12] LIU Mengmeng, ZHANG Qingwen, FAN Feng, et al. Experiments on natural snow distribution around simplified building models based on open air snow-wind combined experimental facility[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2018, 173: 3. DOI: 10.1016/j.jweia.2017.12.010

[13] MICHELETTI N, CHANDLER J H, LANE S N. Investigating the geomorphological potential of freely available and accessible structure-from-motion photogrammetry using a smartphone [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2015, 40: 480. DOI: 10.1002/esp.3648

[14] GOMEZ-GUTIERREZ A, SCHNABEL S, BERENGUER-SEMPERE F, et al. Using 3D photo reconstruction methods to estimate gully headcut erosion[J]. Catena, 2014, 120: 97. DOI: 10.1016/j.catena.2014.04.004

[15] FONSTAD M A, DIETRICH J T, COURVILLE B C, et al. Topographic structure from motion: A new development in photogrammetric measurement[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2013, 38(4): 425. DOI: 10.1002/esp.3366

[16] LINGUA A, MARENCHINO D, NEX F. Performance analysis of the SIFT operator for automatic feature extraction and matching in photogrammetric applications[J]. Sensors, 2009, 9(5): 3755. DOI: 10.3390/s90503745

[17] 朱雷鸣,吴晓平,李建伟,等. 直角坐标系的欧拉旋转变换及动力学方程[J]. 海洋测绘,2010,30(3):20
ZHU Leiming, WU Xiaoping, LI Jianwei, et al. Euler rotation transformation and dynamic equation of Cartesian coordinate system [J]. Hydrographic Surveying and Charting, 2010, 30(3): 20

[18] 严剑锋. 地面 LiDAR 点云数据配准与影像融合方法研究[D]. 徐州:中国矿业大学,2014:20
YAN Jianfeng. Research on terrestrial LiDAR point cloud data registration and fusion method of point cloud and images[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2014: 20

[19] BOLANDZADEH N, BISCHOF W, FLORES-MIR C, et al. Multimodal registration of three-dimensional maxillodental cone beam CT and photogrammetry data over time [J]. Dentomaxillofacial Radiology, 2013, 42(2): 80. DOI: 10.1259/dmfr/22027087

[20] AL-MANASIR K, FRASER C S. Co-registration of photogrammetric and laser scanner data for generation of 3D visual models[C]// Proceedings of International Conference on Virtual Reality, Archaeology and Intelligent Cultural Heritage. Brighton: Eurographics Association, 2006: 63

(编辑 赵丽莹)