

文章编号:1000-0240(2012)03-0618-07

基于数字摄影测量的雪盖制图方法探讨

刘俊峰^{1,2}, 陈仁升^{1,2}, 宋耀选^{1,2}, 阳勇^{1,2},
韩春坛^{1,2}, 卿文武^{1,2}, 刘章文^{1,2}

(1. 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所 黑河上游生态—水文试验研究站, 甘肃 兰州 730000;

2. 中国科学院生态水文与流域科学重点实验室, 甘肃 兰州 730000)

摘要: 受地形、植被、太阳辐射以及分吹雪等因素影响, 山区积雪时空分布差异性很大, 人工观测和卫星遥感手段很难获取高时空分辨率的雪盖信息. 2010年3—5月在祁连山葫芦沟一级小支流开展了相机摄影试验, 并应用摄影测量技术将野外拍摄影像转化为正射积雪空间分布图像, 以此获取小流域高时空分辨率的积雪分布信息. 结果表明: 20次摄影测量后方交会解得到的摄影中心与实测摄影中心误差 ΔX 分布在 $-9.27\sim 25.51$ m之间, 而 ΔY 分布在 $-33.53\sim 18.2$ m, ΔZ 区于 $-3.33\sim 9$ m之间. 单张积雪制图误差分析表明, ΔX 分布在 $-9.27\sim 25.51$ m之间, 而 ΔY 分布在 $-33.53\sim 18.2$ m, ΔZ 区于 $-3.33\sim 9$ m之间, 边缘处积雪制图误差大于中心位置. 进一步分析表明, 高程数据精度、摄影距离和摄影倾角等因素影响数字摄影测量雪盖制图的精度. 随着地形数据精度的提高, 正射积雪制图的精度有很大的提升空间, 相机摄影测量也将成为小流域尺度、坡面尺度雪盖信息获取的有效手段之一.

关键词: 摄影测量; 雪盖; 误差分析

中图分类号: P232 文献标识码: A

0 引言

融雪水资源作为中国西部春季消融季节的重要水补给源, 对当地工农业和人民生活起着至关重要的作用^[1]. 因此, 融雪径流模拟和预测尤为重要. 由于积雪的空间分布和面积基本决定着融雪径流的幅度^[2], 精确获取积雪的空间分布和面积参数对融雪径流模拟具有重要的意义^[3]. 目前, 国内、国际上提供的积雪遥感监测信息主要为区域和全球尺度积雪监测提供可靠信息^[4-6], 而对流域尺度的积雪消融模拟预报, 这些信息远远不能满足精度需求. 高分辨率遥感影像能够获取流域尺度不同坡度坡向积雪分布信息, 但时间分辨率较粗, 不能满足模型的输入或验证需求. 同时, 所有的遥感影像不同程度的受到云干扰, 云盖下的积雪信息难以获取.

摄影测量通过摄影手段确定目标的外形和运动状态^[7], 其应用领域涉及到文物保护修复、建筑物变形分析、地表生物量获取^[8]、森林资源调查^[9]、交通事故信息获取及灾害的监测和评估等方面^[10].

该方法有严谨的理论支撑和软硬件支持, 这给研究人员可以提供相当高精度和可靠的基础数据. 就摄影测量在积雪研究领域的应用而言, Corripio^[11]于2004年应用摄影测量方法获取了法国高山冰川积雪覆盖区反照率时空变化; Farinotti等^[12]利用摄影测量方法获取了消融期积雪空间分布变化, 并将摄影测量数据结合消融模式模拟积雪消融过程. 但在国内, 很少有摄影测量方法用于积雪空间分布和面积获取的应用研究. 因此, 本文尝试通过使用普通数码相机获取逐日小流域积雪空间分布影像, 编程实现摄影测量系统, 通过已有的小流域正射数字化地形图, 制作积雪影像的正射投影, 以期获取小流域尺度高精度的逐日积雪空间分布和面积.

1 测量原理

数字摄影测量是基于数字影像与摄影测量的基本原理, 应用计算机技术、影像处理、影像匹配和模式识别等多学科的理论与方法, 提取所摄对象,

收稿日期: 2011-11-26; 修订日期: 2012-02-18

基金项目: 国家自然科学基金项目(91025011; 91125013); 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所人才基金项目(Y251B21001)资助

作者简介: 刘俊峰(1982—), 宁夏中卫人, 助理研究员, 2011年在中国科学院寒区旱区环境与工程研究所获博士学位, 主要从事雪水文研究. E-mail: liujfyou@lzb.ac.cn

用数字方式表达的几何与物理信息^[13]。它以普通数码相机或测量相机为工具,对目标进行摄影获取目标物体的影像数据,借助计算机建立数字近景测量系统,以摄影测量共线方程(公式(1)、(2))为主要理论基础,从而把物方空间和相方空间联系起来^[7]。简单的说,摄影测量就是将摄影过程利用像片定向,重建可测量几何立体模型的过程。

立体模型的重建需要用到内方位元素、外方位元素、共线方程等原理,下面将分别进行介绍。

1.1 内方位元素

内方位元素是确定相机的镜头中心相对与影像位置关系的参数,用 f 、 x_0 、 y_0 表示;其中, f 为镜头中心到影像面的垂距(也称主距), x_0 、 y_0 表示像主点相对于影像中心的位置。内方位元素一般在实验室采用物理方法检定。

1.2 外方位元素

外方位元素是确定相机光束在摄影瞬间的空间姿态和位置的参数,包括 3 个空间位置(X_s 、 Y_s 、 Z_s)和 3 个姿态角参数(φ 、 ω 、 κ)。由于本文摄影点在地表,所以空间位置直接由 GPS 定位直接获取。

1.3 共线方程

共线方程是确定像方空间坐标与物方空间坐标关系的表达式,其表达式为:

$$x - x_0 = -f \frac{a_1(X - X_s) + b_1(Y - Y_s) + c_1(Z - Z_s)}{a_3(X - X_s) + b_3(Y - Y_s) + c_3(Z - Z_s)} \quad (1)$$

$$y - y_0 = -f \frac{a_2(X - X_s) + b_2(Y - Y_s) + c_2(Z - Z_s)}{a_3(X - X_s) + b_3(Y - Y_s) + c_3(Z - Z_s)} \quad (2)$$

式中:像点 p 、投影中心 S 和物点 A 三点共线(图 1);(X_s 、 Y_s 、 Z_s)、(X 、 Y 、 Z)分别为投影中心点和目标点 A 在物方空间中的坐标;(x 、 y 、 $-f$)为 A 点投影到像片中的空间坐标; f 为摄影机主距; a_i 、 b_i 、 c_i ($i=1, 2, 3$)为影像的 3 个外方位角元素组成的 9 个参数。

2 数据与方法

本文以祁连山高山区葫芦沟流域一级支流为试验研究区,其地理位置为 38.2°N 、 99.9°E ,流域面积 1.17 km^2 ,海拔 $3060 \sim 3610 \text{ m}$ 。小流域流域西南高,东北低,坡度分布在 $6^\circ \sim 51^\circ$ (图 2)。3—5 月的野外积雪观测试验表明:小流域积雪厚度达到 $5 \sim 10 \text{ cm}$ 时,有太阳照射下的阳坡积雪完全消融需要 $2 \sim 5 \text{ h}$,而阴坡则需要 $1 \sim 10 \text{ d}$ 的时间,所以

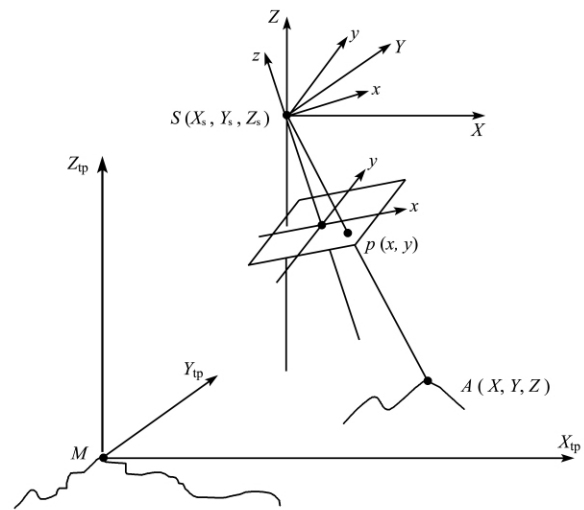


图 1 地面坐标系和像空间坐标系

Fig. 1 Coordinate systems of the ground and the image space

阴坡积雪是本次摄影测量主要关注的区域。针对雪盖分布特点,选择位于小流域的东北方向山包作为摄影测量点(摄影中心)(图 2),在该点拍摄的影像在小流域阴坡几乎无遮蔽,这将有助于最大化获取雪盖信息。此外,本次摄影测量会造成阳坡局部地区形成遮蔽效应,但遮蔽面积所占比例不大。遮蔽区的积雪空间分布成图将在下文中进一步的讨论。

2010 年 3 月 28 日—5 月 5 日对小流域有积雪覆盖时进行逐日摄影测量,测量相机采用佳能 Powershot S2IS 普通数码相机,影像分辨率为 $2592 \times 1944 \text{ dpi}$,高斯投影下的摄影中心物方空间坐标为 $(577793.0, 4238422.45, 3150)$ 。由于普通数码相机内方位元素不稳定,其误差是测量或求解过程中产生的误差,也是系统误差,难以改正^[14]。本文在使用编程实现近景摄影测量系统时,对每次拍摄的相片主距(f)采用试算法,而像主点相对于影像中心的位置 x_0 、 y_0 在此默认为像片的中心位置。

近景摄影测量中,需要在被摄对象布设一定数量的控制点帮助解算各个定向参数。本次试验由于小流域分布有一些明显的特征点,据此把这些特征点作为控制点(图 3),其坐标(X 、 Y)由日本先进陆地观测卫星 ALOS(Advanced Land Observation Satellite)遥感影像确定,高程信息(Z)利用 $1:5$ 万数字化地形图确定。小流域特征点在像方空间所对应点位的获取采用图像处理软件辅助,利用人工判读找出像片中相对应点的行列号,进而计算像方空间坐标(x 、 y)。由于逐日拍摄点固定,也就是说外方位元素 X_s 、 Y_s 、 Z_s 已知,而另外 3 个用于描述影像在拍摄瞬间的空中姿态的角元素是未知的,因此外方

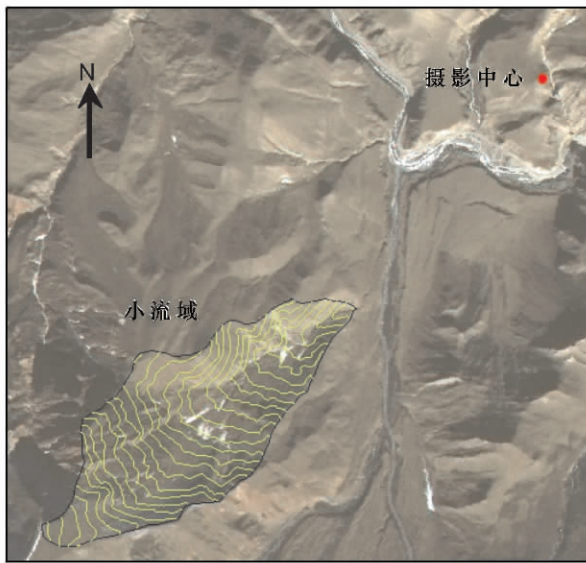


图 2 摄影中心与小流域的空间相对位置

Fig. 2 Locations of the photography center and the small watershed

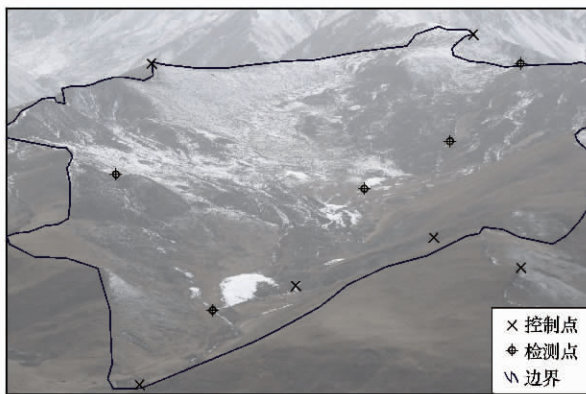


图 3 葫芦沟所在小流域中的校正点及检测点分布

Fig. 3 Locations of ground control points and check points in the small watershed of Hulusi River

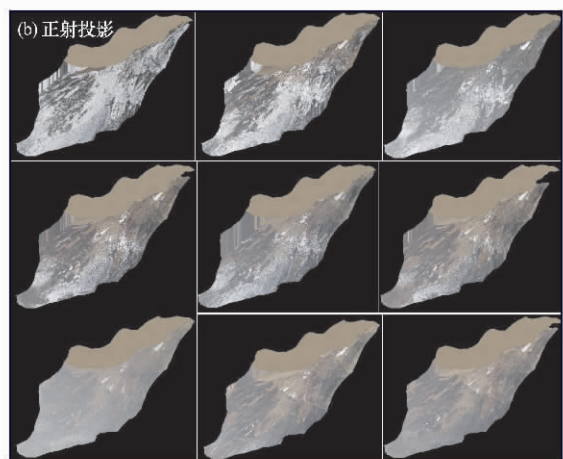
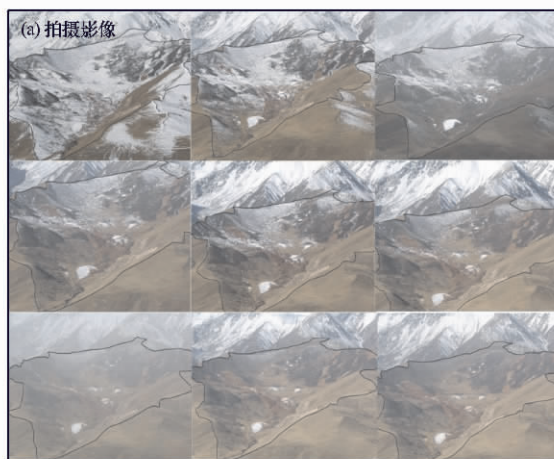


图 4 小流域一次积雪消融过程的积雪摄影测量像片及其对应的正射投影积雪空间分布

Fig. 4 Snowmelt process photos (a) and their orthographic projection maps (b) in a small watershed

位元素的求解过程就是 3 个姿态角参数(φ, ω, κ)的获取, 利用最小二乘间接平差原理求解角元素。

基于近景摄影测量的积雪空间分布正射投影影像获取以及积雪面积测算过程如下: 1) 选取小流域 4~5 个明显的特征点, 利用 ALOS 遥感影像及 1:5 万数字化高程图获取这些特征点的物方空间坐标; 2) 利用图像处理软件找到正射地图投影中物方空间坐标对应的像方空间坐标; 3) 利用已知的物方空间坐标和相应点的像方坐标, 根据共线条件方程, 求解该影像在拍摄时刻的外方位元素。由于普通数码相机主距 f 不固定, 所以此处求解外方位元素时, 利用试算法(给 f 一个赋值区间, 该区间包含正确的 f), 当所选主距计算所得位置参数和以知的摄影中心偏差最小时, 认为该主距就是相机拍摄时的主距; 4) 利用求解的内外方元素和物方空间坐标, 求解小流域每个物方空间坐标(或栅格)对应的像方空间坐标, 并把像方坐标下的 RGB 值赋值给物方坐标, 从而生成正射 RGB 彩色积雪覆盖图像; 5) 选取适当标准, 统计小流域积雪覆盖栅格数量, 计算积雪覆盖面积和比例。

3 结果分析

3.1 被遮蔽区积雪信息的获取

由于摄影倾角较大, 且小流域地形起伏较大造成局部被遮挡未能成像。对于这样的地方, 当纠正得到正射影像后, 会在对应的遮蔽区留下积雪信息空白区, 即这部分区域的积雪信息无法从原始影像上获得。从理论上讲, 对遮蔽信息进行获取的最好方法就是通过另一张该处没有被遮蔽的影像来进行信息填充^[15]。但积雪消融受地形因素影响明显, 当

获取非遮蔽区的积雪信息之后,可以利用遮蔽区的海拔高度、坡度和坡向估计积雪信息.本文利用已知的地形数据分析遮蔽区的地形信息,找到距离被遮蔽区最近与之地形相似点未遮蔽区的积雪信息替代被遮蔽区的积雪信息.由于小流域阳坡是遮蔽发生的主要区域,而2010年3—5月影像拍摄过程中只有一次拍摄到了全流域被积雪覆盖的情况.其他拍摄均发生在阳坡积雪覆盖很小或无积雪.因此,在积雪空间分布制图过程中,小流域阳坡自动识别为无积雪覆盖区.

3.2 雪盖制图及面积提取

在解决了遮蔽区积雪信息获取方法后,正射投影下的小流域积雪信息获取仅仅是把像方空间获取的彩色RGB信息赋值给物方空间对应的栅格点.像方空间栅格大小与物方空间栅格大小不一致,文中正射投影栅格大小为 $5\text{ m}\times 5\text{ m}$,像片中心栅格分辨率为 0.2 m .对此问题,文中采用正射投影栅格中心坐标对应的像方空间RGB值作为整个 $5\text{ m}\times 5\text{ m}$ 栅格的RGB值.图4展示了2010年3月28日—4月7日一次完整的积雪消融过程拍摄影像及其对应的正射积雪空间分布图.雪盖制图需要从正射图中区分地面无雪区与积雪覆盖区.RGB彩图中积雪覆盖区显白色,但由于小流域阴坡灌木发育,面积覆盖比例占到40%,其下方的积雪判读存在一定

的困难.在此结合相机拍摄的像片,利用人工判读的方法得到正射投影RGB彩图中的积雪空间分布范围和覆盖面积.图5给出了2010年3月28日—4月7日一次完整积雪消融过程的面积变化.

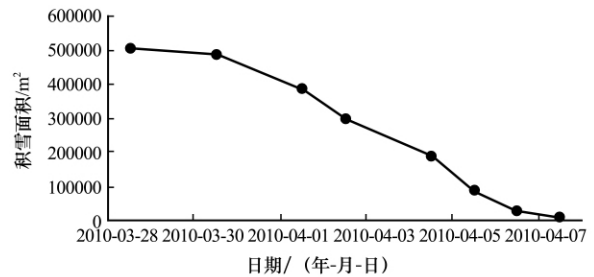


图5 利用摄影测量获取的小流域积雪覆盖面积变化

Fig. 5 The area of snow covered area in a small watershed by the using of photogrammetry

3.3 误差分析

3.3.1 摄影中心误差分析

表1给出了利用共线方程求解得到的摄影中心后方交会解与实测摄影中心的误差,可以看出整个20次拍摄过程的后方交会解与实测摄影中心都存在一定的误差,其中 ΔX 分布在 $-41\sim 78\text{ m}$ 之间,而 ΔY 分布在 $-42\sim 29\text{ m}$, ΔZ 区分布于 $-41\sim 7\text{ m}$ 之间,后方交会解与实测摄影中心存在一定的误差.分析造成误差的可能原因主要有以下几项因素:其一,小流域高程数据采用1:5万地形图获

表1 实测与利用共线方程求解得到的摄影中心误差对比

Table 1 Calculated and measured projection center projection centers

影像代码	摄影中心后方交会解/m			实测摄影中心/m			误差/m		
	X'_s	Y'_s	Z'_s	X_s	Y_s	Z_s	ΔX	ΔY	ΔZ
IMG_1529	577807.60	4238430.92	3133.68	577793.0	4238422.45	3150	14.60	8.47	-16.32
IMG_1535	577801.04	4238412.54	3147.72	577793.0	4238422.45	3150	8.04	-9.91	-2.28
IMG_1546	577781.91	4238408.92	3139.65	577793.0	4238422.45	3150	-11.09	-13.53	-10.35
IMG_1556	577784.78	4238393.12	3152.61	577793.0	4238422.45	3150	-8.22	-29.33	2.61
IMG_1562	577786.78	4238392.51	3151.18	577793.0	4238422.45	3150	-6.22	-29.94	1.18
IMG_1573	577788.59	4238385.45	3156.46	577793.0	4238422.45	3150	-4.41	-37.00	6.46
IMG_1580	577772.57	4238398.71	3128.01	577793.0	4238422.45	3150	-20.43	-23.74	-21.99
IMG_1587	577850.76	4238452.10	3149.00	577793.0	4238422.45	3150	57.76	29.65	-1.00
IMG_1603	577788.05	4238388.17	3154.29	577793.0	4238422.45	3150	-4.95	-34.28	4.29
IMG_1608	577788.26	4238385.23	3157.17	577793.0	4238422.45	3150	-4.74	-37.22	7.17
IMG_1629	577783.69	4238407.87	3138.96	577793.0	4238422.45	3150	-9.31	-14.58	-11.04
IMG_1657	577750.92	4238422.46	3117.79	577793.0	4238422.45	3150	-42.08	0.01	-32.21
IMG_1663	577785.87	4238406.39	3138.21	577793.0	4238422.45	3150	-7.13	-16.06	-11.79
IMG_1687	577754.99	4238380.26	3151.40	577793.0	4238422.45	3150	-38.01	-42.19	1.40
IMG_1692	577775.66	4238422.52	3109.41	577793.0	4238422.45	3150	-17.34	0.07	-40.59
IMG_1696	577783.62	4238407.01	3139.97	577793.0	4238422.45	3150	-9.38	-15.44	-10.03
IMG_1702	577786.56	4238408.09	3140.23	577793.0	4238422.45	3150	-6.44	-14.36	-9.77
IMG_1713	577770.22	4238422.53	3116.18	577793.0	4238422.45	3150	-22.78	0.08	-33.82
IMG_1717	577783.61	4238407.58	3139.28	577793.0	4238422.45	3150	-9.39	-14.87	-10.72
IMG_1744	577774.51	4238422.48	3111.12	577793.0	4238422.45	3150	-18.49	0.03	-38.88

表 2 正射积雪制图检测点与误差对比

Table 2 The check points of the orthographic projection of snow cover, together with their errors

影像代码	检测点检测点坐标/m			积雪制图坐标/m			误差/m		
	X_s	Y_s	Z_s	X'_s	Y'_s	Z'_s	ΔX	ΔY	ΔZ
1 河冰	576325.00	4236808.80	3160.00	576350.51	4236819.00	3157.36	25.51	18.20	-2.64
2 植被类型 过渡点	575477.30	4236346.10	3407.23	575471.90	4236352.70	3403.90	-5.40	6.60	-3.33
3 河冰	575744.15	4236514.20	3305.00	575734.88	4236518.50	3307.38	-9.27	4.21	2.38
4 植被类型 过渡点	575155.32	4236022.00	3552.22	575146.93	4235988.30	3561.53	-8.39	-33.53	9.31
5 植被类型 过渡点	576261.89	4236491.30	3272.00	576253.51	4236480.10	3276.00	-8.38	-11.18	4.00

取, 由于数据已有 30 a 的历史, 实际的地形与地形图存在较大误差, 这在很大程度上影响了物方空间 Z 轴坐标的精度; 其次, 摄影中心距离小流域几何中心直线距离约为 2 670 m, 摄影距离较远, 而且摄影中心与小流域构成的摄影倾角在 45° , 倾角很大, 这要求控制点定位要尽可能的精确, 但野外测量由于缺少精确定位的仪器, 从而造成后方交会解存在一定的误差; 此外, 普通数码相机内方位元素的不稳定性也是造成误差的因素。

3.3.2 雪盖制图误差分析

为确保正射积雪空间分布图的精度, 需要对积雪制图结果做进一步的误差分析。利用陆地观测卫星 ALOS 遥感影像确定一些特征点的坐标 (X, Y) 作为检测点, 利用正射积雪 RGB 彩色影像找到对应点的 (X, Y), 对比两者的误差, 确定正射积雪制图空间点的偏差。此处以 IMG_1535 图像为例进行误差分析。从表 2 给出的检测点偏差来看 (检测点位空间分布见图 3), ΔX 分布在 $-9.27 \sim 25.51$ m 之间, 而 ΔY 分布在 $-33.53 \sim 18.2$ m, ΔZ 区分布在 $-3.33 \sim 9$ m 之间。从检测点所处位置来看, 检测点 1 靠近像片下方边缘, 检测点 4 位于像片上方边缘, 二者误差较大其误差 ΔX 、 ΔY 、 ΔZ 最大分为 25.51、18.2 m 和 9.31 m, 而检测点 2、3 和 5 靠近像片中心, 其误差 ΔX 、 ΔY 、 ΔZ 小于 15 m。这说明在摄影测量中, 像片中央畸变较小, 而边缘畸变较大, 从而造成边缘积雪制图误差大于中心位置。考虑到正射积雪制图栅格分辨率为 5 m, 这意味着正射积雪制图中靠近流域边缘某栅格点记录的积雪信息可能是周围 30 m 半径内某点的积雪信息。而靠近流域中心栅格点记录的积雪信息是周围

15 m 范围。

4 结论与讨论

数字摄影测量与传统的摄影测量相比, 成本低、成图周期短、精度高、天气要求低, 能够快速、准确、经济地获取、更新基础地理信息^[16]。目前, 由于量测相机其专业性, 不仅价格昂贵, 而且使用复杂, 因此限制了其使用的普遍性。近年来, 随着数码相机的分辨率和镜头质量以及各种功能都在快速提升, 而同时其价格便宜、重量轻、使用方便、性能与操作上较灵活方便。随着数字图像处理、模式识别等理论和技术以及数码相机标定技术不断完善, 标定精度不断的提高, 普通 CCD 数码相机愈来愈广泛应用于摄影测量领域。

相关研究表明, 我国积雪主要分布在高山地区^[4]。2010 年 3—5 月在祁连山葫芦沟开展积雪综合观测试验发现, 由于山区地形复杂, 人工观测仅仅限于地形较缓、海拔不高的区域, 对于高海拔、地形陡峭的区域很难开展积雪观测工作。同时, 利用人工观测和踏勘仅能获取一些单点的雪特性, 很难及时掌握该流域积雪空间分布特征, 所以相机摄影成为获取雪盖信息最直接、快速和有效的手段。由于在每年积雪累计初期以及消融期, 积雪消融迅速, 雪盖面积日变化很大, 需要每天一次的拍摄, 特殊时期, 还需要一天三次拍摄, 所以要求相机轻便、能够调焦、操作简单等特点, 因此, 非量测相机成为观测的首选。此外, 由于积雪摄影测量观测频率高, 周期较长, 采用非量测相机能够有效的降低成本。

本文尝试利用摄影测量方法, 通过正射投影制

图提取积雪面积信息。误差分析表明: 利用共线方程求解得到的摄影中心与实测摄影中心有误差, 整个 20 次拍摄过程的误差 ΔX 分布在 $-9.27 \sim 25.51$ m 之间, 而 ΔY 分布在 $-33.53 \sim 18.2$ m, ΔZ 区于 $-3.33 \sim 9$ m 之间。选取单张正射积雪制图进行误差分析, 结果表明真实的积雪空间分布会在 X 轴和 Y 轴方向分别有较大的位移, 其中边缘误差明显大于中心误差。分析表明, 这些误差是由于高程数据精度不高、摄影距离较远、摄影倾角很大造成。

由《近景摄影测量规范 GB/T12979-2008》来看^[17], 非量测摄影机适用于中、低精度摄影测量任务。本次野外积雪摄影测量主要以低成本、快速、有效的获取地表面积雪覆盖信息。由于野外客观条件限制以及试验项目资金和技术条件限制, 最终获取的正射积雪制图精度不尽如人意。但相对目前在积雪消融模型中广泛应用的 MODIS 积雪产品来说^[18-23], 本文获取的积雪空间分布能够反映葫芦沟流域一级支流 1.17 km^2 空间上不同坡度坡向上的积雪时空分布演化特征, 而 MODIS 积雪遥感影像 $500 \text{ m} \times 500 \text{ m}$ 的影像分辨率根本无法做到这一点。同时, 摄影测量几乎不受天气和云的影响。相比较人工积雪观测, 摄影测量成本较低, 而且获取的积雪空间分辨率很高, 对一些人工观测较难到达的高山区, 摄影测量可以轻松获取积雪覆盖信息。由于本文用到的地形数据精度不高, 相机内方位元素没有在室内检定, 造成获取的正射积雪制图精度相对较差, 但随着摄影测量相机性能的改进和地形数据精度的提高, 正射积雪空间分布制图的精度有很大的提升空间。所以, 在所获取的正射积雪空间分布制图精度问题上, 本文没有过多涉及, 而仅仅只是尝试把摄影测量方法应用到积雪空间分布制图中。同时也可以看到, 由于地形的相互遮挡, 积雪摄影测量往往会形成一些积雪信息的空白区, 所选的摄影点(摄影中心)和摄影时段有效的规避了被遮蔽区的积雪信息获取的难度, 但在地形更为复杂的区域, 这些空白区的积雪信息获取将是比较棘手的问题。

致谢: 感谢沈永平研究员和车涛研究员的有益讨论, 对审稿老师惠赐良好建议深表感谢。

参考文献 (References):

[1] Wang Jian Li Wenjun. Establishing simulated model of snowmelt runoff for large scale basin in western China[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1999, 21(3): 264-

268. [王建, 李文君. 中国西部大尺度流域建立分带式融雪径流模拟模型[J]. 冰川冻土, 1999, 21(3): 264-268.]

[2] Rango A. Spaceborne remote sensing for snow hydrology applications[J]. Hydrological Sci J, 1996, 41(4): 281-292.

[3] Fu Guobin, Liu Changming. Advances in applications of remote sensing data to hydrology[J]. Advances in Water Science, 2001, 12(4): 547-558. [傅国斌, 刘昌明. 遥感技术在水文学中的应用与研究进展[J]. 水科学进展, 2001, 12(4): 547-558.]

[4] Liu Junfeng, Chen Rensheng. Validation of MODIS snow covered days by the combined using of MODIS Aqua and Terra snow cover products and in-situ observations all over China [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2011, 33(3): 504-511. [刘俊峰, 陈仁升. 基于 MODIS 双卫星积雪遥感数据的积雪日数空间分布研究[J]. 冰川冻土, 2011, 33(3): 504-511.]

[5] Xu Xinkui. Spatiotemporal variation and regional distribution characteristics of snowfall in China from 1970-2000 [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2011, 33(3): 497-503. [徐兴奎. 1970-2000 年中国降雪量变化和区域性分布特征[J]. 冰川冻土, 2011, 33(3): 497-503.]

[6] He Liye, Li Dongliang. Classification of snow cover days and comparing with satellite remote sensing data in west China [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2011, 33(2): 237-245. [何丽烨, 李栋梁. 中国西部积雪日数类型划分及与卫星遥感结果的比较[J]. 冰川冻土, 2011, 33(2): 237-245.]

[7] Feng Wenhao. Close-range Photogrammetry [M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2002: 1-16. [冯文灏. 近景摄影测量[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2002: 1-16.]

[8] Zhang Xiuping, Zou Zhengrong, Yu Jiayong, et al. Application of digital close-range photo grammetry in measuring growth of plants[J]. Journal of Geomatics, 2008, 33(4): 24-26. [张秀平, 邹峥嵘, 李克纲, 等. 基于近景摄影测量的植物生长量量测方法研究[J]. 测绘信息与工程, 2008, 33(4): 24-26.]

[9] Feng Zhongke, Yin Jianjian, Jia Jianhua, et al. Forest measurement in fixed sample plot by digital close-range photogrammetric survey [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2001, 23(5): 15-18. [冯仲科, 殷嘉俭, 贾建华, 等. 数字近景摄影测量用于森林固定样地测树的研究[J]. 北京林业大学学报, 2001, 23(5): 15-18.]

[10] Wan Youchuan, Zhang Yongjun. Progresses and trends of photogrammetry and remote sensing[J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2009, 19(6): 6-12. [万幼川, 张永军. 摄影测量与遥感学科发展现状与趋势[J]. 工程勘察, 2009, 19(6): 6-12.]

[11] Corripio J G. Snow surface albedo estimation using terrestrial photography[J]. Int. J. Remote Sensing, 2004, 25(24): 5705-5729.

[12] Farinotti D, Magnusson J, Huss M, et al. Snow accumulation distribution inferred from time-lapse photography and simple modeling[J]. Hydrological Processes, 2010, 24: 2087-2097.

[13] Tong Qingxi, Zheng Lanfen, Wang Jinnian Wang Xiangjun et al. Study on imaging spectrometer remote sensing information for wetland vegetation[J]. Journal of Remote Sensing, 1997, 1(1): 40-57. [童庆禧, 郑兰芬, 王晋年, 等. 湿地植被成像

- 光谱遥感研究[J]. 遥感学报, 1997, 1(1): 40-57.]
- [14] Peng Yongchao. Data processing and error analysis of low altitude areo-photographic measurement[J]. EPG, 2008, 18(2): 78-81. [彭永超. 低空摄影测量的数据除与误差分析[J]. 物探装备, 2008, 18(2): 78-81.]
- [15] Li Deren, Wang Shugen, Zhou Yueqing. An Introduction to Photogrammetry and Remote Sensing[M]. Beijing: Surveying and Mapping Press, 2008, 146-148. [李德仁, 王树根, 周月琴. 摄影测量与遥感概论[M]. 北京: 测绘出版社, 2008, 146-148.]
- [16] Yang Zhaohui, Li Hao, Yang Lin. Research on measurable digital camera[J]. Engineering of Surveying and Mapping, 2003, 12(2): 34-37. [杨朝辉, 李浩, 杨林. 数码相机可量测化的研制[J]. 测绘工程, 2003, 12(2): 34-37.]
- [17] Song Yaodong, Duan Yihong, Xu Zhuoyou, *et al.* Specifications for close-range photogrammetry (GB/T 12979-2008) [S]. Beijing: China Standards Press, 2008: 1-23. [宋耀东, 段怡红, 许卓群, 等. 近景摄影测量规范(GB/T 12979-2008) [S]. 北京: 中国标准出版社, 2008: 1-23.]
- [18] Dery S J, Salomonson V V, Stieglitz M, *et al.* An approach to using snow areal depletion curves inferred from MODIS and its application to land surface modeling in Alaska[J]. Hydrological Processes, 2005 19: 2755-2774.
- [19] Brown L, Thorne R, Woo M K. Using satellite imagery to validate snow distribution simulated by a hydrological model in large northern basins[J]. Hydrological Processes, 2008, 22: 2777-2787.
- [20] Immerzeel W W, Droogers P D, Jong S M, *et al.* Large-scale monitoring of snow cover and runoff simulation in Himalayan river basins using remote sensing[J]. Remote Sensing of Environment, 2009, 113: 40-49.
- [21] Shamir E, Georgakakos K P. Distributed snow accumulation and ablation modeling in the American River basin[J]. Advances in Water Resources, 2006, 29: 558-570.
- [22] Li Hongyi, Wang Jian. The snowmelt runoff model applied in the upper Heihe River Basin [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2008, 30(5): 769-775. [李弘毅, 王建. SRM融雪径流模型在黑河流域上游的模拟研究[J]. 冰川冻土, 2008, 30(5): 769-775.]
- [23] Liu Junfeng, Yang Jianping, Chen Rensheng, *et al.* The Simulation of snowmelt runoff model in the Dongkemadi River Basin, Head water of the Yangtze River[J]. Acta Geographica sinca, 2006, 61(11): 1149-1159. [刘俊峰, 杨建平, 陈仁升, 等. SRM融雪径流模型在长江源区冬克玛底河流域的应用[J]. 地理学报, 2006, 61(11): 1149-1159.]

Mapping Snow Cover Based on Digital Photogrammetry

LIU Jun-feng^{1, 2}, CHEN Ren-sheng^{1, 2}, SONG Yao-xuan^{1, 2}, Yang Yong^{1, 2},
HAN Chun-tan^{1, 2}, QING Wen-wu^{1, 2}, LIU Zhang-wen^{1, 2}

(1. Qilian Alpine Ecology & Hydrology Research Station, Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou Gansu 730000, China; 2. Heihe Key Laboratory of Ecohydrology and Integrated River Basin Science, Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou Gansu 730000, China)

Abstract: Spatial and temporal distribution of snow cover is complicated and greatly affected by topography, land cover, radiation and snow drifting. Snow cover information with high spatial and temporal resolution is hard to obtain by in-situ measurements or satellite image. In this paper, a small watershed of Hulugou River was selected as a conventional photography experiment field. It was tried to use photos by using photogrammetry to obtain spatial distribution information of snow cover through orthographic Projection system. It was found that between the measured and the calculat-

ed projection centers there was a difference ΔX of $-9.27 \sim 25.51$ m, a difference ΔY of $-33.53 \sim 18.2$ m and a difference ΔZ of $-3.33 \sim 9$ m. Error analysis of single snow cover map shows that the differences in X , Y and Z are $-9.27 \sim 25.51$ m, $-33.53 \sim 18.2$ m and $-3.33 \sim 9$ m, respectively. Further analyses indicate that the precision of snow cover mapping depends on precision of DEM, photographic distance and photographic angle. However, with the improvement of basic topographic data, snow cover map derived from photogrammetry will be advanced.

Key words: photogrammetry; snow cover; error analysis