

多线结构光在地形测量中的应用

徐飞龙 徐向舟 刘亚坤 王书芳 赵 超

(大连理工大学 水利工程学院 辽宁 大连 116024)

Application of Multi-line-structure Light in the Topographic Survey

XU Feilong, XU Xiangzhou, LIU Yakun, WANG Shufang, ZHAO Chao

摘要:首先介绍多线结构光测量系统的结构及其工作原理,并对测量系统的多线结构光激光源的系统误差进行分析;然后将测量系统应用于冲刷坑模型实际测量中,测量数据经图像分析软件处理后,得到地形等高线图和三维模型;最后在地形的断面点高程数据分析中,将多线结构光法与传统测针法的测量结果进行对比,发现两者呈高度线性相关,平均相对误差小于1%。试验结果表明,多结构光法是一种观测精度和效率较高的非接触式三维地形测量方法。

关键词:线结构光;地形测量;测针法;误差分析

一、引言

在地形测量领域中,传统观测仪器如水准仪、经纬仪、全站仪等因具有观测原理简单、观测精度高和操作简便等特点而得到广泛应用。但这些方法基本属于单点的接触式测量,存在如外业工作量大、效率低、容易破坏地形以及难以对地形进行面测量等缺陷。而结构光视觉测量技术兼有激光测量的精确性和摄影测量的高效性,弥补了传统测量技术的不足。

结构光视觉测量技术是一种获取物体表面深度信息的主动视觉测量方法^[1],具有大量程、大视场、较高精度、光条纹图像信息提取简单、实时性强及主动受控性强等特点^[2],已广泛应用于机器视觉、工业检测、逆向工程等领域^[3-6]。根据照射系统采用的结构光方式不同,可划分为点结构光法、线结构光法、多线结构光法、网格结构光法、二进制编码、灰度编码及彩色编码方法等^[1,5]。点结构光和线结构光法获取深度图像信息的技术成熟,但是逐点测量则要求采集和处理较多的图像,这从根本上降低了测量的效率。而多线结构光法则能有效地提高测量的速度,特别有助于对大尺度、复杂曲面的物体轮廓进行实时测量。

本文构建了基于多线结构光法的三维地形测量系统,并将该测量系统应用于冲刷坑模型地形的测量中,得到被测地形的等高线图及地形三维模型。同时,将多线结构光法测得的地形断面高程数据与传统的测针法测量结果进行了对比分析。

二、多线结构光测量系统

1. 测量系统结构及其工作原理

测量系统包括激光源、CCD 摄像机、激光定位点传感器、计算机、支架平台及控制结构等部分。其工作原理如下:首先,激光源向周围被测物体投射一组相互平行且等间距的激光平面(多光平面),多光平面与物体表面相交形成一组反映其表面形态特征的激光条纹;同时,再由激光定位点传感器沿垂直于多光平面的方向发射一组相互平行的激光束,该激光束与被测物体相交为一组激光定位点;然后,CCD 摄像机通过计算机指令,沿摄像机透镜主光轴与多光平面垂直的方向,与激光源共同完成被测物体光条纹图像采集;最后,根据激光定位点的已知相对坐标分别对光条纹图像进行畸变矫正和尺寸率定,通过二维、三维图像分析软件(AutoCAD/ArcGIS)对光条纹图像进行二值化、融合处理,形成被测物体等值线图及其三维模型,进行相关计算分析。其流程如图1所示。

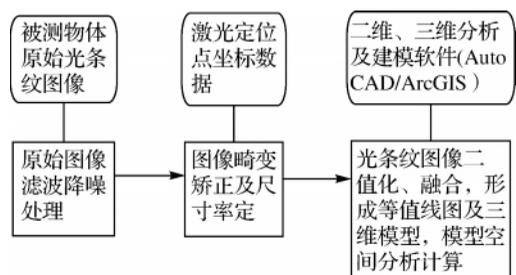


图1 多线结构光测量系统测量流程

收稿日期: 2011-03-29

基金项目: 中国水利水电科学研究院开放研究基金(IWHR02009009); 水利部黄河泥沙重点实验室开放课题基金(2009002); 国家自然科学基金(51079016)

作者简介: 徐飞龙(1984—)男,江西上饶人,硕士生,研究方向为水土保持和水环境治理。

2. 激光平面误差

激光源是测量系统的重要组成部分,本测量系统采用可靠且容易实现的激光器阵列方式构造。为确保系统能达到较高的测量精度,多光平面必须满足彼此之间相互平行。为了评价激光源系统误差,对多光平面间距进行实测分析。

首先,在多光平面上设置以激光源为中心,直径分别为1 000 mm、2 000 mm、3 000 mm和4 000 mm的4个检测圆环,沿每一检测圆环上布置4个等间距的测量点,并沿各个测量点的铅垂方向固定刻度

板;然后,校正多光平面角度使其与水平面平行,调整刻度板的高度使起始激光中心线与刻度板上的起始刻度线重合,在刻度板的左、中、右3个位置分别读取每一根激光中心线对应的刻度值,取其平均值为对应激光线的刻度读数;最后,把每一检测圆环上4个测点的刻度读数平均计算,得到该测量直径下对应多光平面间距的测量值。激光源量程为400 mm,相邻光平面理论间距为50 mm,刻度板的最小刻度为1 mm。分析测量值与理论值的误差,结果如表1所示。

表1 多光平面间距误差分析结果

光平面 编号	理论值 /mm	$d = 1\ 000\ \text{mm}$		$d = 2\ 000\ \text{mm}$		$d = 3\ 000\ \text{mm}$		$d = 4\ 000\ \text{mm}$	
		测量值 /mm	相对误差 /(%)	测量值 /mm	相对误差 /(%)	测量值 /mm	相对误差 /(%)	测量值 /mm	相对误差 /(%)
1	0	0.0	0.00	0.0	0.00	0.0	0.00	0.0	0.00
2	50	50.0	0.00	50.0	0.00	49.9	-0.25	49.6	-1.00
3	100	100.0	0.00	100.1	0.25	100.0	0.00	99.9	-0.25
4	150	150.2	0.50	150.2	0.50	150.3	0.75	150.1	0.25
5	200	200.1	0.25	200.1	0.25	200.3	0.75	200.1	0.17
6	250	250.0	0.00	250.1	0.25	250.0	0.00	249.8	-0.50
7	300	300.0	0.00	300.0	0.00	299.5	-1.25	299.1	-2.25
8	350	350.0	0.00	350.1	0.25	350.1	0.25	349.8	-0.50
9	400	400.1	0.25	400.1	0.25	400.0	0.00	400.0	0.00

由表1可知,当 d 在0~2 000 mm时,多光平面间距的相对误差 $\leq 1\%$;当 d 在2 000~4 000 mm时,多光平面间距的测量相对误差 $\leq 5\%$;随着测量直径增大,光平面间距的相对误差逐渐增大。经计算表1中理论值与测量值的绝对误差可知,当 d 在0~4 000 mm时,多光平面间距的绝对误差 $\leq 1\ \text{mm}$ 。结果表明,该激光源的多光平面的平行度较好,在小范围地形中,能满足一般测量要求。

三、冲刷坑地形测量

冲刷坑是河工模型研究中的常见地形。图2所示冲刷坑水平投影面积为1 400 mm×1 700 mm、深为500 mm、边坡坡度为 $10^\circ \sim 60^\circ$,其表面为连续的自由曲面。在地形上布置15个水平间距为100 mm的断面,断面线上布置水平间距为50 mm的测点,所有测点构成水平间距为100 mm×50 mm的网格测点。

1. 测针法

测针法是一种可精确测量地形表面特征点三维坐标的传统测量方法,主要通过地形上导轨的平稳定位,使测针精确定位到地形表面的任意一点,

以实现表面特征点的平面坐标及其表面深度值的测量。测针法测量布置如图3所示,沿地形纵、横方向分别布置直线导轨,两根纵向导轨平行布置在地形两侧,横向导轨通过两端的滑块可在纵向导轨上滑移;测针通过固定滑块安装在横向导轨上,可在导轨上自由滑移;导轨上固定有最小刻度为1 mm的刻度尺,测针的有效读数为0.1 mm,纵向导轨顶部的安装高程差 $\leq 0.1\ \text{mm}$ 。



图2 冲刷坑地形模型

测量地形表面测点网格为100 mm×50 mm。在施测时须对测针的铅垂度进行校正,并保证测针在移动过程中测杆始终在铅垂方向。

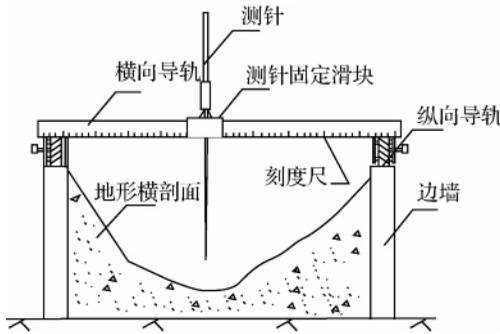


图3 测针法测量示意图

2. 多线结构光法

测量系统中激光光源的光平面间距为 50 mm,为使测量系统能够测量到精确的地形表面形态,须增加激光光源的扫描密度(扫描间距设为 10 mm)。由于多光平面与水平面平行,所以光平面与被测地形形

成的激光条纹即为地形等高线。其测量步骤如下:首先,从激光源的初始起测高程开始以 10 mm 间距垂直升高(或降低)激光源,拍摄 5 帧不同起测高程的地形光条纹图像,这里将激光源的第 1 个光平面的高程定义为起测高程;然后,将图像经滤波降噪处理后导入 ArcGIS 中,在 Georeferencing 模块支持下,依据激光定位点和均匀分布的网格测点的平面坐标对 5 帧图像进行畸形变形矫正和图像尺寸率确定(4 个直线排列的激光定位点和 29 个均匀分布的网格测点);最后,将处理后的地形光条纹图像导入 CAD 提取图像光条纹或在 ArcGIS 的 ArcScan 模块中进行二值化,得到不同起测高程的等高线图,再叠加融合即可形成 10 mm 扫描间距的地形等高线图。地形等高线叠加融合流程如图 4 所示。

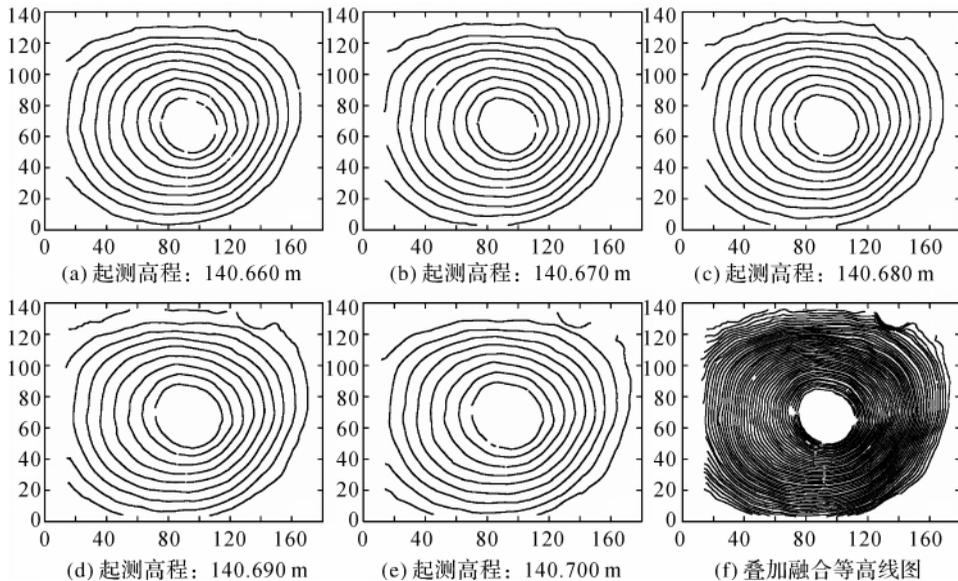


图4 等高线叠加融合流程

目前,基于 CAD 平台的应用技术成熟、数据处理过程简单,故多线结构光法在地形等高线测量应用中具有一定实用性。为了进一步对地形表面特征点空间坐标、面积、体积及断面等参数测量计算,须建立地形三维模型,进行相应的 3D 分析。

3. 观测结果对比分析

(1) 断面测点高程分析

在 ArcGIS 的 ArcScene 模块中,将地形光条纹图像映射到三维模型上形成三维纹理模型,通过查询纹理模型上断面测点标示点的坐标即可精确得到多线结构光法的断面测点高程值(地形断面测点在测量前用黑色标示)。选取代表地形不同深度的第 4、10、12、13、14 共 5 个断面,以测针法测量数据

为基准值,把两种测量方法测得的断面测点高程值统一坐标系后,从线性回归和统计两方面对两种测量方法的测量结果进行对比。其分析结果如表 2 所示。

从表 2 可知,在 5 个断面测点系列高程值线性回归分析中,斜率与相关系数值近似于 1,表明多线结构光法的测量值与基准值呈高度线性相关。经统计分析,测量值的均方误差 $\leq \pm 1.5$ mm,平均偏差 ≤ 0.5 mm,满量程平均相对误差 $\leq 1\%$,表明测量值有较好的准确度。

(2) 地形三维模型分析

在 ArcGIS 9.2 平台支持下,分别将测针法测得的地形网格点的三维坐标数据和多线结构光得到

的地形等高线数据导入到 shape 文件中,建立地形表面 TIN 文件,形成冲刷坑三维模型。如图 5、图 6 所示。

表 2 断面测点高程值分析结果

断面线 编号	测点数	线性回归			统计		
		斜率	y 轴截距/mm	相关系数	平均偏差/mm	均方误差/mm	平均相对误差/(%)
4	23	0.997 3	2.97	0.999 8	-0.25	1.31	-0.63
10	25	0.999 8	0.30	0.999 9	0.07	1.03	0.18
12	24	1.004 8	-5.93	0.999 9	-0.06	0.88	-0.15
13	24	1.006 3	-6.58	0.999 8	0.34	1.02	0.85
14	23	1.001 7	-1.59	0.999 7	0.18	0.81	0.45

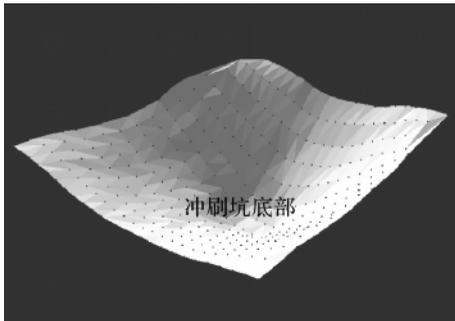


图 5 根据测针法观测数据形成的三维地形

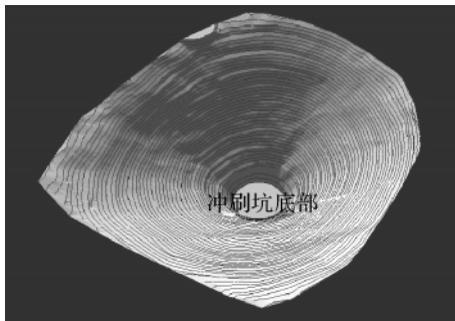


图 6 根据多线结构光法观测数据形成的三维地形

对比图 5 与图 6 发现,基于有限网格测点建立的测针法三维模型的表面粗糙,而基于等高线(或点云)形成的多线结构光法三维模型的表面精细,能反映地形表面的精确形态特征。如果减小多光平面间距或增加扫描密度,则可得更为精确的地形表面模型。因此,多线结构光法在冲刷地形精细测量和精确建模方面具有较大的应用潜力。

四、结束语

本文将基于多线结构光法的多线结构光测量系统应用于冲刷坑地形测量试验中,通过与传统测针法的测量结果对比分析,得出以下结论:①多线结构光法是一种观测精度和效率较高、非接触式的测量方法,在三维冲刷坑地形测量中具有一定的实用性;②与传统测针测量方法相比,多线结构光法在地形精细测量、精确建模方面有更大的应用潜力。

随着线结构光测量技术在高效率、高精度、大尺度及复杂面形测量研究方面的不断发展,这一技术在大范围、复杂曲面地形测量中将具有更广阔的应用前景。

参考文献:

- [1] 王宗义. 线结构光视觉传感器与水下三维探测[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2005.
- [2] 张广军, 王红, 赵慧洁, 等. 结构光三维视觉系统研究[J]. 航空学报, 1999, 20(4): 365-367.
- [3] 李清泉, 王植, 李宇光. 基于线结构光的三维目标测量与多分辨率建模[J]. 测绘学报, 2006, 35(4): 371-378.
- [4] 段发阶. 计算机视觉检测基础理论及应用技术研究[D]. 天津: 天津大学, 1994.
- [5] SALVI J, PAGÈS J, BATLLE J. Pattern Codification Strategies in Structured Light Systems [J]. Pattern Recognition, 2004, 37(4): 827-849.
- [6] 解则晓, 张国雄, 徐玉春. 回转式激光线扫描测量仪[J]. 天津大学学报, 2001, 34(6): 833-836.