

文章编号: 1005-1538(2014)02-0090-07

# 数字近景摄影测量在秦始皇陵百戏坑考古中的应用研究

张春森<sup>1</sup>, 郭丙轩<sup>2</sup>, 吕佩育<sup>1</sup>, 张卫星<sup>3</sup>

(1. 西安科技大学测绘科学与技术学院, 陕西西安 710054;

2. 武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室, 湖北武汉, 430079;

3. 秦始皇帝陵博物院, 陕西西安, 710600)

**摘要:** 既要保留遗迹在不同阶段的信息资料, 又不影响发掘研究工作的继续进行, 一直是考古工作者探索研究的问题。为配合秦始皇陵百戏俑坑的考古发掘工作, 为后续考古研究和文物遗迹的保护提供必要的基础信息资料, 针对大场景考古发掘现场, 通过数字全站仪对文物挖掘现场布设的一定数量控制点进行观测获取其三维点位坐标。利用非量测数码相机获取现场多航带序列影像, 通过数码相机检校、自动空中三角测量、影像特征提取与影像匹配、数字微分纠正等数字近景摄影测量方法, 获取反映发掘现场文物分布情况的数字高程模型 (DEM) 和正射影像 (DOM) 数据。在生成的正射影像图上进行文物轮廓线条的提取, 获得发掘现场文物的正射投影矢量图。实现文物位置、形状及分布的平面量测。实验证明: 该方法不仅可大面积、快速获取文物挖掘现场文物分布的正射投影平面图, 实现考古数字制图, 而且能保证一定的精度。具有较高的推广应用价值。

**关键词:** 数字近景摄影测量; 田野考古; 文物制图; 正射影像图

**中图分类号:** K8541.1      **文献标识码:** A

## 0 引言

田野考古制图是文物考古工作的重要内容, 传统的方法是使用绘图、照相、摄像和文字等手段记录遗迹、遗址的几何信息和三维形态, 很难做到精确反映挖掘现场文物分布情况, 为以后的研究展示提供必要的资料。既要保留遗迹在不同阶段的信息资料, 又不影响发掘研究工作的继续进行, 一直是考古工作者探索研究的问题。配合秦陵百戏俑坑考古发掘, 针对考古调查与发掘特点, 采用数字近景摄影测量方法, 在文物挖掘现场布设一定数量的控制点及获取现场序列影像的基础上, 通过数码相机检校、挖掘现场序列影像获取、空中三角测量自动解算等工作, 生成反映发掘现场文物分布情况的数字高程模型 (DEM) 和正射影像 (DOM) 数据。利用生成的正射影像数据进行文物线条的提取, 获得文物的正

射投影矢量图。实现文物位置、形状及分布的平面量测, 进而准确提供文物挖掘现场文物分布位置、密度等情况, 这将为考古发掘、考古调查、遗址保护规划编制等相关领域研究提供科学依据。

## 1 非量测相机检校及序列影像获取

### 1.1 非量测相机检校

采用非量测数码相机进行数字近景摄影测量, 相机检校是其首要工作内容。相机检校的精度直接影响着后续立体量测数据的可靠性。为此, 采用相机检校精度高、稳定性好的基于三维控制场的相机检校方法。针对基于三维相机检校控制场控制点数目多、标志点纹理特征相似, 难以实现标志像方坐标自动识别与高精度量测的问题, 提出在物方空间增加布设三维坐标已知的编码标志方案。通过对编码标志的自动识别、DLT 计算, 实现控制场像点坐标自

收稿日期: 2013-11-14; 修回日期: 2013-05-17

基金项目: 陕西省自然科学基金资助(2010JM5009), 秦始皇帝陵博物院 2010 年度课题资助, 秦始皇帝陵博物院 2011 年度课题资助

作者简介: 张春森(1963—), 男, 博士, 教授, 2004 年博士毕业于武汉大学遥感信息工程学院, 主要从事摄影测量与遥感方面的研究与教学。E-mail: zhchunsen@qq.com

动初定位。在此基础上通过标志点最小二乘椭圆拟合,最小二乘直线拟合等步骤,实现控制像点坐标高精度定位(量测精度 0.04 像元)。控制场物方控制(编码)标志点量测采用特高精度精密工程测量的方法,平均点位精度 0.22mm。相机检校在西安科技大学测绘学院相机检校场进行,程序采用具有自主知识产权的 GodWork 软件完成。图 1 为控制标志像点自动定位结果。

1.2 百戏坑及控制点布设及序列影像获取

本研究以秦陵百戏俑坑 3 号过洞为对象,该部分俑坑范围长约为 20.5m,宽约为 3.2m,深约为 4.5m。事先在坑底均匀布设一定数量的控制点,在距坑底位置高度大约 6m 的悬空缆绳上,安置普通数码相机遥控拍照获取挖掘现场序列影像。分 3 个航带摄取整个 3 号过洞俑坑影像。影像航向重叠度 90% 左右,旁向重叠度 85% 左右。整个测区共拍摄片 83 张。图 2 为挖掘现场坑底控制点布设示意图。



图 1 控制标志像点自动定位

Fig.1 Control mark image point automatic positioning



图 2 控制点布设示意图

Fig.2 Control point distribute map

2 解析空中三角摄影测量及正射影像生成

基于数字近景摄影测量方法生成考古挖掘现场 DEM 数据及 DOM 图,工作内容包括:特征点提取及

影像匹配、添加像控点、空中解析三角摄影测量、DEM 自动提取及正射影像生成和影像镶嵌等步骤。处理流程如图 3 所示。

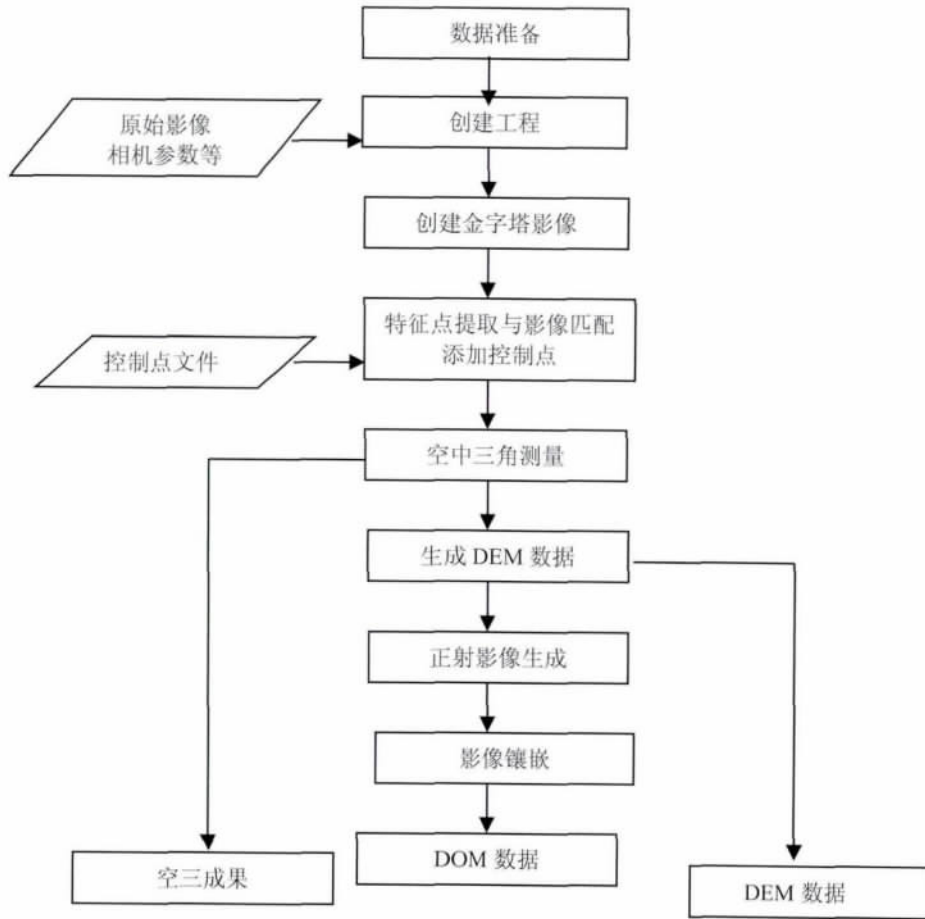


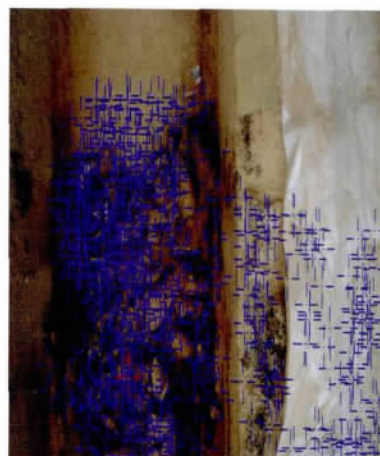
图 3 DEM 数据及正射影像图生成流程

Fig.3 Flow chart of DEM and orthophoto image map

### 2.1 特征提取与特征匹配

为实现不同影像同名点匹配进行控制点、连接点量测,采用基于特征的影像匹配方式。依次采用 Harris 和 SIFT 算子提取影像特征点, Harris 算子能较好地提取角点,且不受摄影机姿态及光照的影响,但对于较大的尺度变化不能保持特征的不变性。SIFT 算子对平移、旋转、尺度缩放、亮度变化保持不变性,对视角变化、仿射变化、噪声

也保持一定程度的稳定性。通过两种算子提取特征点,保证了对不同类型的影像数据都能提取出足够数量和精度的影像特征点。在此基础上,采用 SIFT 进行特征描述,建立 128 维描述子。以描述子距离作为相似性度量,采用 KDTree 搜索策略进行特征匹配,在保证匹配准确度的基础上,大大提高匹配的速度。图 4 为一对影像特征提取及匹配结果示意图。



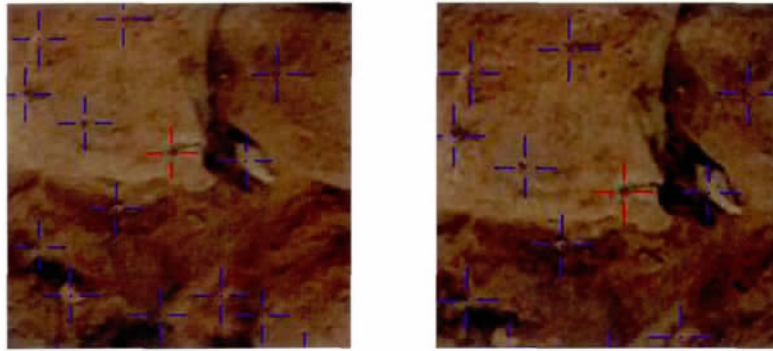


图 4 影像特征提取及匹配

Fig. 4 Sketch map of Image feature extraction and matching

### 2.2 空中三角摄影测量解算

由于本研究影像获取为非常规摄影测量方式,存在基高比小、重叠度不稳定、外方位元素未知等问题。

为满足 DEM 生产及正射影像制作精度要求,数据处理需具有较传统空三解算粗差检测能力更强的功能。整个空中三角摄影测量解算流程如图 5 所示。

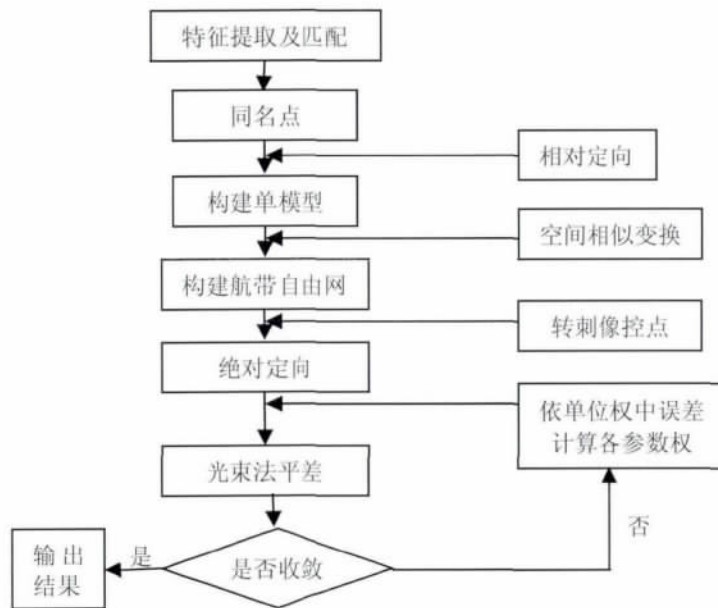


图 5 空三解算流程

Fig. 5 Flow chart of automatic aerotriangulation

2.2.1 区域自由网构建 首先利用不同影像间同名像点和相机参数进行相对定向,构建单模型,计算每条航带内相邻影像之间的相对位置和姿态。然后利用空间相似变换进行模型连接,构建航带模型。最后利用空间相似变换计算测区内所有(包括航带内和航带间的)影像之间的相对位置和姿态,构建区域自由网。

这里相对定向采用计算机视觉中相机运动参数直接估计的方法,即通过求解本质矩阵  $E$ ,并从中直接获得相邻相机的相对定向参数的算法。这样一方面有效地解决了传统摄影测量相对定向需提供初值问题,同时也避免了解算结果

对初值的依赖。

2.2.2 自由网平差 为有效地检测粗差,以构建自由网结果为初值进行光束法平差,剔除残差较大的点,得到稳定的外方位元素和加密点坐标。即以每幅影像所组成的一束光线作为平差的基本单元,以中心投影的共线方程作为平差的基础方程。通过各个光线束在空间的旋转和平移,使模型之间公共点的光线实现最佳的交会,并使整个区域最佳的纳入到已知的控制点坐标系统中。

2.2.3 控制网平差 对于坑底已知的控制点信息,采取手工转刺像控点或自动导入像控点坐标(刺点精度应保证在一个像素以内)。然后进行控制点绝

对定向,将自由网模型转换到控制点坐标系中。进行控制网平差,去除残差大的点,得到控制点坐标系下的外方位元素和加密点坐标。控制网平差同样采用光束法。

### 2.3 生成 DEM

在得到稳定的控制网(或自由网)之后,利用已有的影像连接点坐标内插生成 DEM。针对不同类型的影像,可采用不同的内插方法。三角网法是利用已有的连接点构三角网,再根据三角网内插出格网的高程值。反距离法是根据周围一定范围内的点加权平均得到高程值,距离越远权值越小。一般来说,在已知点比较稀疏或有较大漏洞时,采用三角网法比较好。建筑物较多的地区用反距离法可以起到平滑作用,效果比较好。对于百戏坑影像,由于相对于测区航高来说,测区的地形变化比较大,采用三角网法生成 DEM 效果更好。

### 2.4 正射影像生成及其影像镶嵌

采用反解法(间接法)计算生成正射影像。首先利用外方位元素和已知的相机参数求单张影像所对应的 DEM 范围。再按照所生成的正射影像分辨率及对应的 DEM 范围计算正射影像的宽高。最后循环每一个正射影像上的像素(点),计算出平面坐标,用 DEM 内插出该点的高程,投影到原始影像上去,用双线性内插法计算 RGB 值,作为正射影像该像素的 RGB 值。

为了得到整个挖掘现场正射影像需进行影像镶嵌处理,即将不同的相片按照坐标和纹理进行拼接处理。不同的相片对比度和色调不一致,所以在拼接前还需进行匀光、匀色处理,匀光是统一对比度,匀色是统一色调。图 6 是利用 orthovista 对所有的单幅正射影像进行拼接,得到的挖掘现场整幅正射影像。



图 6 挖掘现场的正射影像

Fig.6 Orthophoto image of excavation site

图 7 为在挖掘现场正射影像图上勾绘获得的文物矢量等值线数据,该图件在一定程度上能准确提供文物挖掘现场文物分布位置、密度等情况。为后

续考古研究和文物遗迹的保护提供必要的基础信息资料。



图 7 陶俑遗迹平面图

Fig.7 Pottery figurine relics plan

### 3 结 论

本研究针对大场景考古发掘现场,采用类似无人机摄影测量数据处理方法,应用具有自主知识产权的GodWork软件实现非量测相机检校、自动空中三角摄影测量解算,生成考古挖掘现场正射影像图及DEM数据,为文物考古工作服务,大大地拓宽了近景数字摄影测量的应用领域。针对文物考古的特点,采用上述数据,基于密集匹配实现发掘现场三维重建是我们的后续研究工作。

#### 参考文献:

- [1] 冯恩学. 田野考古学[M]. 长春: 吉林大学出版社, 2008.  
FEN En-xue. Field archaeology [M]. Changchun: Jilin University Press, 2008.
- [2] 徐承泰. 关于田野考古绘图的一点思考[J]. 华夏考古, 2006, (4): 99-104.  
XU Cheng-tai. Some ideas on field archaeological drawing [J]. Huaxia Archaeol 2006 (4): 99-104.
- [3] 张 蕾, 刘建国. 数字影像纠正与考古绘图[J]. 考古, 2009, (7): 644-649.  
ZHANG Lei, LIU Jian-guo. Digital image correction and archaeological drawing [J]. Archaeology 2009 (7): 644-649.
- [4] 杨 林, 闫国年, 盛业华, 等. 基于 SuperMap 的田野考古制图[J]. 地球信息科学, 2006, 8(1): 121-126.  
YANG Lin, LV Guo-nian, SHENG Ye-hua, et al. Design and implementation of mapping information system for field archaeology [J]. Geo-Inf Sci, 2006, 8(1): 121-126.
- [5] 秦 岭, 张 海. 电子全站仪在田野考古中的应用[J]. 考古, 2006, (6): 73-78.  
QIN Ling, ZHANG Hai. Application of the electronic total station in field archaeology [J]. Archaeology 2006 (6): 73-78.
- [6] 张春森. 摄影测量学[M]. 西安: 西安地图出版社, 2009.  
ZHANG Chun-sen. Photogrammetry [M]. Xi'an: Xi'an Mapping Press, 2009.
- [7] 刘小明, 李悦丽, 郭福生, 等. 基于全数字摄影测量系统的数字正射影像图的制作[J]. 测绘科学, 2010, 35(S1): 198-199.  
LIU Xiao-ming, LI Yue-li, GUO Fu-sheng, et al. Producing digital orthophoto based on full digital photogrammetry system [J]. Sci Surv Map 2010, 35(S1): 198-199.
- [8] 杨 林, 盛业华, 闫国年, 等. 数字摄影测量技术在田野考古制图中的应用[J]. 工程勘察, 2004, (5): 47-49.  
YANG Lin, SHENG Ye-hua, LV Guo-nian, et al. Application of digital photogrammetry in field archaeology mapping [J]. Geotech Invest Surv 2004 (5): 47-49.
- [9] 方剑强. 生产数字正射影像图(DOM)的若干技术问题探讨[J]. 测绘与空间地理信息, 2007, (3): 91-93.  
FANG Jian-qiang. Discussion on several technical problems about producing DOM [J]. Geomat Spatial Inf Technol, 2007, (3): 91-93.
- [10] 曾成强. QuickBird 卫星正射影像图的制作[J]. 城市勘测, 2008, (6): 78-81.  
ZENG Cheng-Qiang. The facture of orthophoto map from QuickBird satellite image [J]. Urban Geotech Invest Surv, 2008 (6): 78-81.
- [11] 李先怡. 特征点匹配技术在无人机影像匹配中的研究与应用[D]. 西安科技大学, 2011.  
LI Xian-yi. The research and application of the unmanned aerial vehicle image matching based on feature point [D]. Xi'an University of Science and Technology 2011.
- [12] 柯涛, 张永军. SIFT 特征算子在低空遥感影像全自动匹配中的应用[J]. 测绘科学, 2009, 34(4): 23-26.  
KE Tao, ZHANG Yong-jun. The application of SIFT features in the automatic matching for low altitude aerial images [J]. Sci Surv Map, 2009, 34(4): 23-26.
- [13] 王玉宏, 陈永立. 低空遥感影像匹配与拼接技术研究[J]. 测绘信息与工程, 2009, 34(2): 47-48.  
WANG Yu-hong, CHEN Yong-li. Automatic matching and panorama generation of low altitude aerial images [J]. J Geomat, 2009, 34(2): 47-48.
- [14] 陈信华. SIFT 特征匹配在无人机低空遥感影像处理中的应用[J]. 地矿测绘, 2008, 24(2): 10-12.  
CHEN Xin-hua. Application of SIFT feature matching of sheet edges to the process of remote sensing image of unmanned air vehicle on the low attitude [J]. Surv Map Geol Min Res 2008, 24(2): 10-12.

## Application of digital close-range photogrammetry during archaeological excavation of the acrobatic figurines pit at the Qin Shi Huang Mausoleum site

ZHANG Chun-sen<sup>1</sup>, GUO Bing-xuan<sup>2</sup>, LV Pei-yu<sup>1</sup>, ZHANG Wei-xing<sup>3</sup>

(1. College of Geometrics, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China;

2. State Key Laboratory of Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing, Wuhan University, Wuhan 430079, China;

3. Emperor Qinshihuang's Mausoleum Site Park, Xi'an 710600, China)

**Abstract:** The drawing of archaeological sites is important for the field of archaeology. On the one hand, information at various stages of excavation of archaeological sites should be preserved; on the other, excavation of the sites should not be interrupted. Therefore, this topic has always been explored by archaeologists. The archaeological excavation of the acrobatics figurines pit (K9901) of Qin Shi Huang Mausoleum was used as an example to record the site information for future archaeological studies and cultural relic protection. Aiming for large scale archaeological projects, a method of digital close range photogrammetry was developed for application to field archaeology mapping. The three-dimensional parameters at certain control points during excavation of relics site were obtained using electronic total stations. The multi-strip sequence images of the archaeological excavation site were taken using a non-metric digital camera. Using the digital photogrammetry method, a digital elevation model (DEM) and a digital orthophoto map (DOM) can be obtained that reflected the distribution of the objects in the excavation site. The contour lines of the relics from the orthophoto images were used to construct an orthographic vector graph of the archaeological excavation site. It recorded the positions of the relics and their shape and distribution. This experiment showed that it was possible to obtain, rapidly, highly precise digital maps of large archaeological sites. The method is worth applying to other similar projects.

**Key words:** Digital close-range photogrammetry; Field archaeology; Archaeological drawing; Orthophoto image

(责任编辑 谢 燕)