

基于遥感的明长城立体量测

陈军^①, 金舒平^①, 廖安平^①, 赵有松^①, 张宏伟^①, 荣大为^②, 杨招君^②

① 国家基础地理信息中心, 北京 100048;

② 中国文化遗产研究院, 北京 100029

E-mail: chenjun@nsdi.gov.cn

2010-01-22 收稿, 2010-03-22 接受

国家自然科学基金(40830636, 40671034)和中国科学院资源环境领域野外台站研究基金资助项目

摘要 举世闻名的中国长城是绵延数千千米的庞大军事防御体系, 具有独特的历史、艺术、科学价值, 1987 年被联合国教科文组织整体列入世界遗产名录. 受历史条件和量测技术所限, 人们一直未能对长城资源进行系统科学的测量与调查, 缺乏关于长城实际长度、资源分布、保存现状等方面的全面信息. 针对当前长城保护、研究、修缮和管理等的迫切需要, 自 2006 年起, 国家文物局和国家测绘局利用航空遥感、地理信息系统等先进技术手段, 联合开展了明长城长度测量与资源调查, 建立起明长城沿线带状地带 1:10000 精度的立体遥感影像模型, 在田野调查成果的基础上, 准确测定了人工墙体、天然险、壕堑以及各种附属设施的空间分布与长度, 获得了明长城实际长度、资源分布、保存现状等第一手资料, 摸清了明长城的实际情况. 明长城总长度为 8851.8 km, 其中人工墙体为 6259.6 km, 天然段 2232.5 km, 壕堑 359.7 km. 明长城测量和资源调查成果为划定长城保护范围和建设控制地带、编制保护规划、制定保护修缮方案、建立数字长城等提供了强有力支持, 将有利于长城保护与研究工作的深入开展.

关键词

明长城
遥感
立体像对
长度
立体量测

公元前 7 世纪的春秋时期, 人们用城墙把烽火台、城堡、河谷、山崖、壕堑、道路等连接起来, 构筑长达数十甚至上百千米的大规模防御体系, 成为早期的长城. 公元前 221 年秦始皇完成统一大业后, 开始大规模修建长城, 其后又历经了 10 余个朝代的持续建设, 形成了绵延数千千米的古代人工防御工程, 被称为“万里长城”, 成为中华民族的象征和世界上规模最大的历史文化遗产之一^[1]. 但长期以来, 人们对长城的实际情况不清, 缺乏对长城实际长度、资源分布、保存现状等科学统一、准确可靠的认识, 严重地制约了对长城这一世界文化遗产的有效保护、科学研究、高效管理与合理利用.

究其原因, 主要是受历史条件和技术手段等多种因素的制约, 过去一直未能对长城长度与资源分布进行系统科学的全面测量与调查. 据史记, 长城修筑“因地形, 用险制塞”. 尤其是明代在山区修建长城

时, 尽量把城墙修建在山脊外侧陡峭的山崖边缘上, 利用峭壁本身增加城墙高度, 并尽可能地利用山险、水险等天然险作为其组成部分, 使得长城墙体及各种附属设施所处的地形极为复杂, 单纯使用皮尺、手持 GPS 等难以进行精确测量. 为摸清长城实际情况, 国家文物局和国家测绘局首次联合运用数字摄影测量与地理信息系统等先进技术手段, 科学地测定明长城的空间分布与坡面长度, 同时综合地调查明长城的资源分布与保存现状.

1 总体技术思路

摄影测量与遥感是历史文化遗产研究的重要信息手段. 早在 1969 年, 国际古迹遗迹理事会(ICOMOS)和国际摄影测量与遥感学会(ISPRS)就联合成立了国际历史文化遗产记录委员会(CIPA), 推动摄影测量和其他测量技术在文化遗产记录、监测、

保护、修复、研究等方面的应用^[2,3]。当前国内外该领域的主要热点包括三维精细建模、多维数字记录、虚实融合集成、大遗址调查等^[4-6]。就大遗址调查而言,英国军械局曾利用摄影测量手段进行了哈德良长城(Hadrian's Wall)的1:10000测图,测定其长度为117 km (http://www.eng-h.gov.uk/archcom/projects/summaries/html98_9/cc2290.htm);我国北京市也曾于1985年利用航空正射影像进行了北京地区长城现状调查,直接测定了其投影长度,但并非三维坡面长度^[7]。

本研究的总体技术思路是,利用高分辨率航空影像立体像对,构建明长城沿线带状地带高精度的立体遥感影像模型,结合大范围的田野调查资料,立体测定人工墙体和天然险、壕堑以及各种附属设施的空间分布,分类统计明长城长度与资源分布,建立明长城资源地理信息系统^[8]。首先按照1:10000航空摄影测量规范,对近万张航空影像进行空中三角测量,建立起覆盖整个明长城沿线带状区域的立体影像模型,以确保量测的几何精度;继而根据文物专家实地田野调查资料,如明长城墙体类型(人工、天然险、壕堑等)、保存程度(较好、一般、差、消失等)和材质(石墙、砖墙、土墙等)等,在立体影像模型上沿墙体表面中心线进行三维拐点的量测与折线拟合,逐段确定长度,同时对各种附属物进行立体测定;然后按照长城资源调查的有关要求,进行分类(墙体保存程度、材质)和分段的长度计算与各类信息汇总,求出明长城总长度及其空间分布。图1给出了利用遥感立体像对测定明长城长度的总体技术思路。

值得说明的是,明长城分布地域较广、格局复杂,加上受几百年来战争、灾害、建设等自然与人为因素的影响,部分地段墙体遭到不同程度的破坏甚至已经消失。为了准确地确定明长城的空间分布,本研究采取了“文物专家定性、测绘专家量测”的工作模式,借助高分辨率影像和GPS等手段,对明长城沿线两侧各1 km带状范围内的墙体、天险及各种附属设施,实地进行辨识、确认和标注,并记录墙体的名称、位置、文物编码、墙体材质和现存状况等信息,填写墙体调查登记表。对于已确认的明长城墙体,在数字立体测图环境下沿中心线精确量测各拐点三维坐标,计算出分段长度和总长度。

2 带状立体影像模型建立

明长城分布在 $98^{\circ}10' \sim 124^{\circ}35'E$, $36^{\circ}2' \sim 42^{\circ}52'N$

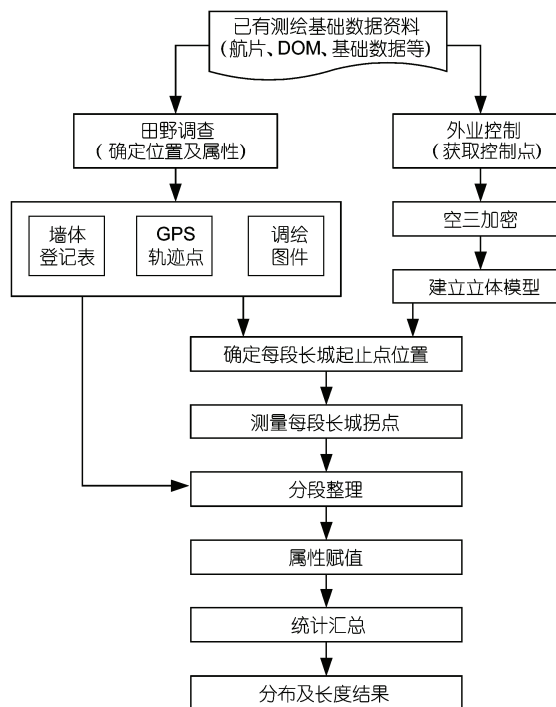


图1 明长城立体量测的总体技术思路

的区域内,空间跨度较长且蜿蜒曲折。就覆盖该带状区域的影像资料而言,其航摄比例尺大于1:35000的达95%;2000~2008年获取的影像资料占70%。为了建立高精度的带状立体影像模型,本研究在严格遵循国家1:10000比例尺地形图航空摄影测量外业规范和内业规范的基础上,充分利用GPS和精确大地水准面等技术成果,将规范要求的平面控制点和高程控制点全部设计为平高控制点,并增加控制点布设密度和个数,减少有关误差。

明长城测量区域共涉及1970幅1:10000比例尺地形图图幅范围。为提高带状立体模型的精度和稳定性,根据航摄资料及地形情况,将这一带状区域划分成235个空三加密分区,避免了单航线或狭长带状区域网。总共布设了15031个空三加密像控点,定向中误差精度指标明显优于规范要求的平面不超过4 m,高程不超过1.5 m的山地和高山地指标精度要求(明长城分布区域绝大部分为山地和高山地),如表1所示。

3 人工墙体与特殊段落量测

对明长城人工墙体量测而言,首先是在立体模型上准确地确定其每段起止点,然后沿墙体表面中

表 1 空三加密中像控点定向精度(单位: m)

工作区	平面精度		高程精度		工作区	平面精度		高程精度	
	最大限差	中误差	最大限差	中误差		最大限差	中误差	最大限差	中误差
辽宁	3.45	1.12	0.85	0.26	陕西	3.90	1.49	1.49	0.52
河北	3.67	1.10	1.49	0.53	内蒙	2.98	1.21	0.80	0.25
甘肃	2.97	1.16	1.34	0.40	青海	3.79	1.35	1.27	0.41
天津	0.42	0.17	0.11	0.06	宁夏	3.95	2.05	-0.97	0.11
山西	2.24	0.64	1.20	0.10					

心线采集三维(X,Y,Z)方向上任何一维发生变化的拐点坐标,通过拐点连线拟合表达该段长城的空间起伏.为了确保墙体起止点和拐点的准确性,立体量测人员须参照田野调查人员在调绘片上标绘的长城墙体、附属设施以及遗址遗迹的准确位置及范围、以点之记形式记录的属性,以及用手持 GPS 采集的长城墙体起止点、明显拐点、属性变化点、附属设施和遗址遗迹中心点等重要点位坐标信息.同时,采取了多种质量管理措施,如邀请参加实地田野调查的文物专家在立体模型上核实、检核人员参与量测过程等.由于采用了高分辨率航空影像,绝大部分现存长城墙体影像清晰可辨,能准确确定起止点及其走向.对消失段落,主要是由文物专家根据专业知识和参照航空影像,在田野调查中辨识与确认其位置与走向.

根据误差传播定律,长度测量误差与拐点坐标观测误差和拐点连线拟合误差等直接相关.为了降低观测误差,要求作业人员在能够准确反映长城墙体中心线空间分布特征的前提下,尽量减少量测点个数.此外,为避免量测粗差,设计了复测作业方式,即对每段长城沿正反方向各独立量测一次,当量测的长度相对误差(两次量测长度差和两次量测长度平均值之比)小于 1‰时,量测成果为合格,否则要重新量测.据统计,明长城分段复测结果中相对误差小于 0.5‰的分段占总段数的 88.9%.

对于天然险(山险、水险)、山险墙和长城的破损段、消失段等特殊段落,本研究设计采用了专门的测定方法.其中对利用山体、河流等自然地物构筑的山险长城,根据田野调查结果,沿山脊线(图 2(a))或水体中心线采集,山险墙则根据山险上人工修筑的痕迹进行量测.水险中长城走向和河流流向一致时,按照河流的中心线进行量测;长城走向和河流流向相交时,根据田野调查在河流两岸确定长城墙体终结位置,以直线方式连接.

对于墙体破损不一的情况,按照保存完好部分墙体的高度,统一量测该段墙体上表面中心线,不随

破损部分高低起伏量测长城墙体中心线(图 2(b)).如果以消失段落为主,则沿长城分布地表面统一量测该段墙体,不随部分墙体高低起伏量测.对于田野调查认定消失的长城墙体,主要是参照调绘片、GPS 轨迹线和墙体调查表,转绘确定长城分布位置并沿地表面量测.如果只有消失段的起始点位置,按照两点之间地形起伏沿地表面量测,并由田野调查人员在立体下确认.

4 长度计算与精度分析

对量测合格的每段长城墙体(线段),根据田野调查表所记录的墙体性质、墙体类别和保存程度、文物编码、墙体名称等 5 个属性,进行了分段处理与文物属性赋值,共形成了 20364 个长城线段对象.根据三维欧式距离和每段长城段落的属性,计算出每一对象(线段)的坡面长度,然后按墙体类别、保存程度等,进一步统计出明长城分类长度.统计结果表明,明长城东起辽宁丹东虎山,西至甘肃嘉峪关,穿越辽宁、河北、天津、北京、山西、陕西、内蒙古、宁夏、甘肃、青海等 10 个省、市、自治区,总坡面长度为 8851.8 km,包括人工墙体为 6259.6 km,天然段 2232.5 km,壕堑 359.7 km.其中,人工墙体中含石墙 1828.8 km,土墙为 3411.3 km,砖墙为 249.6 km,山险墙为 197.5 km,其他为 572.4 km.

就保存状况而言,明长城人工墙体保存较好的仅为 513.56 km,保存一般的为 1104.4 km,保存较差和差的分别为 1494.7 和 1185.4 km,消失的则达 1961.6 km.由此可知,明长城墙体的保存状况总体堪忧,较好的比例只有不足 10%,一般的只有约 20%.究其原因,主要是几百年来自然和人为两种因素造成的,因此今后必须加大对保护力度.

除了明长城长度之外,此次调查还首次全面掌握了明长城作为一个庞大的军事防御体系的现存状况,包括其附属设施、自然与人文环境、保护和管理现状等.例如,调查结果显示,明长城现存敌台 7062

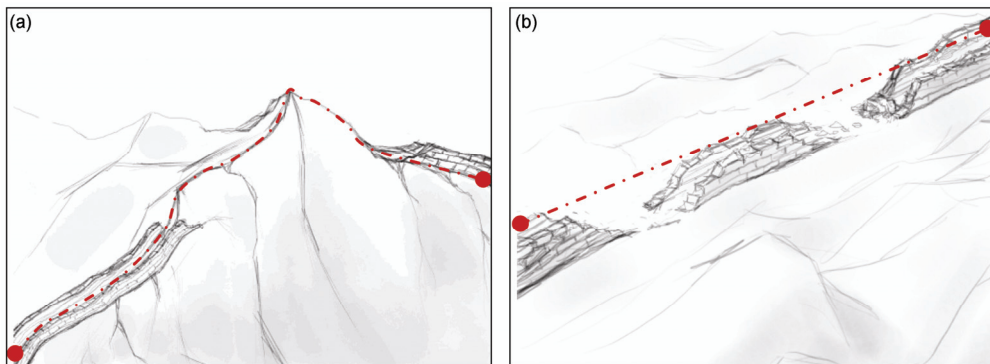


图 2 明长城特殊情况的量测方法示意图

(a) 山险量测; (b) 破损墙体量测

座, 马面 3357 座, 烽火台 5723 座, 关堡 1176 座, 相关遗存 1026 处。

就量测精度而言, 传统摄影测量规范是对观测点的精度进行评价, 给出的是点位坐标相对于真实值的中误差。而明长城长度数据是利用观测点坐标计算得出的, 其精度与点位观测值精度有关。设长城某一折线段中第 i 个拐点的三维坐标为 X_i, Y_i, Z_i , L_i 为第 i 个拐点和第 $i+1$ 个拐点之间线段的长度, $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ 是量测点在三维空间 X, Y, Z 三个方向的精度。由于空三加密点和立体量测点之间基本上相互独立, 不存在点位系统误差, 且点位误差在整个加密分区范围内总体上相等, 在三维方向上相互独立。对长度计算公式取导数线性化后, 可得到每一段长城长度 L 的中误差(σ_L)计算公式如下:

$$\begin{aligned} \sigma_L^2 &= \sum_{i=1}^n \left[\left(\frac{\partial L}{\partial x_i} \right)^2 \sigma_{x_i}^2 + \left(\frac{\partial L}{\partial y_i} \right)^2 \sigma_{y_i}^2 + \left(\frac{\partial L}{\partial z_i} \right)^2 \sigma_{z_i}^2 \right] \\ &= \left[\frac{(x_2 - x_1)^2}{L_1^2} + \sum_{i=2}^{n-1} \left(\frac{x_i - x_{i-1}}{L_{i-1}} - \frac{x_{i+1} - x_i}{L_i} \right)^2 \right. \\ &\quad \left. + \frac{(x_n - x_{n-1})^2}{L_{n-1}^2} \right] \sigma_x^2 \\ &\quad + \left[\frac{(y_2 - y_1)^2}{L_1^2} + \sum_{i=2}^{n-1} \left(\frac{y_i - y_{i-1}}{L_{i-1}} - \frac{y_{i+1} - y_i}{L_i} \right)^2 \right. \\ &\quad \left. + \frac{(y_n - y_{n-1})^2}{L_{n-1}^2} \right] \sigma_y^2 \\ &\quad + \left[\frac{(z_2 - z_1)^2}{L_1^2} + \sum_{i=2}^{n-1} \left(\frac{z_i - z_{i-1}}{L_{i-1}} - \frac{z_{i+1} - z_i}{L_i} \right)^2 \right. \\ &\quad \left. + \frac{(z_n - z_{n-1})^2}{L_{n-1}^2} \right] \sigma_z^2 \end{aligned} \quad (1)$$

$$+ \frac{(z_n - z_{n-1})^2}{L_{n-1}^2} \sigma_z^2. \quad (1)$$

由(1)式可知, “点观测精度”以及“相邻点间斜率”是影响明长城长度精度的主要因素。本项目在 235 个加密区布设了 2020 个检查点, 计算检查点的立体模型观测值与野外实测值之差的中误差, 带入(1)式计算不同段落的量测精度。然后根据(2)式估算出总长度的精度为 0.4 km。

$$\sigma_{L_{\text{总}}} = \sqrt{\sum_{i=1}^n \sigma_{L_i}^2}, \quad (2)$$

其中 $\sigma_{L_{\text{总}}}$ 为总长度的中误差, σ_{L_i} 为第 i 段长城长度的中误差, n 为长城总段数。

经分析, 上述计算精度结果偏高, 主要是由于每个加密区样本集(检查点)为明显地物点, 其观测精度要高于实际拐点的观测精度所造成的。为了进一步分析测量精度, 我们根据实际观测值和国家 1:10000 比例尺地形图航空摄影测量内业规范所确定的碎部点量测精度, 进行了总长度精度推算。按实际明长城 8800 多千米, 如果全部长城都当作山地地形计算, 理论推导其长度中误差在 1.1 km 左右; 如果全部长城都当作丘陵地计算, 理论推导其长度中误差在 0.6 km 左右。实际长城的现状是既有山地、也有丘陵和平地, 结合利用实际检查点推算的结果(0.4 km), 此次长城量测的精度应在千米级水平。

5 结束语

“长城究竟有多长?”是社会各界普遍关注的热点

问题. 国家测绘局和国家文物局利用高精度航空遥感手段, 全面准确地测定了明长城的三维空间分布与坡面长度, 同时完成明长城资源调查, 摸清了明长城实际情况. 该研究为划定长城保护范围和建设控制地带、编制保护规划、制定保护修缮方案、建立数

字长城等提供了第一手真实资料, 有力地支撑了长城保护与研究工作的深入开展. 此外, 也为运用摄影测量与遥感技术进行带状大遗址调查提供了成功经验, 充分展现了现代空间信息技术在历史文化遗产调查与研究中的广阔应用前景.

致谢 本项目设计和实施过程中, 得到了徐冠华、刘先琳、陈俊勇、王任享、张祖勋等院士和郑肇葆、袁修孝、张景雄、史文中、胡志贵、龚循平、李兆平等教授的大力支持与指导, 在此表示感谢.

参考文献

- 1 董耀会. 长城. 北京: 中国水利水电出版社, 2004. 1—10
- 2 Patias P, Grussenmeyer P, Hanke K, Applications in cultural heritage documentation. In: Li Z L, Chen J, Baltsavias M, eds. *Advances in Photogrammetry, remote Sensing and Spatial Information Science*. Hongkong: Taylor Francis CRC Press, 2008. 363—383
- 3 Minna A, Stefanakis L. Ancient Human Traces in Automated Space. *Manual of Geographic Information System Version 1.0*, 2009
- 4 Gruen A, Remondino F, Zhang L. Photogrammetric reconstruction of the great Buddha of Bamiyan, Afghanistan. *Photogramm Rec*, 2004, 107: 177—199
- 5 Li C R, Miao T B, Li Y S. The applications in the Mogao cliff face protection based on digital photogrammetry technology. *Geom Tech Equipm*, 2004, 5: 396—401
- 6 余明, 丁辰, 刘长征, 等. 北京故宫修复测绘研究. *测绘通报*, 2004, 4: 11—13
- 7 景爱. 长城遥感调查与考古. *北方文物*, 2007, 1: 104—107
- 8 Chen J, Zhao Y S, Liao A P, et al. Mapping the Ming Great Wall with imagery. In: Chen J, Jiang J, eds. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. Beijing: Surveying and Mapping Press, 2008. 970—973