

# 基于无人机三维建模技术的桥梁检测方法研究

方留杨, 陈华斌, 吴晓南, 许鹏, 方绍兵

(云南省交通规划设计研究院有限公司, 云南 昆明 650041)

**摘要:** 目前使用无人机进行桥梁检测时, 仅是利用无人机抵近桥梁拍摄高清照片, 通过目视判读的方法对桥梁病害进行单一视角的定性检查。该文提出了一种基于无人机三维建模技术的桥梁检测方法, 可以对病害进行多视角、全方位的观察, 并可进行定量测量和描述。首先针对无人机桥梁检测三维建模的特点和要求, 自主配置了无人机硬件平台; 然后介绍了无人机桥梁三维建模的具体流程和方法, 包括航飞拍摄方案制定、图像预处理、三维立体重建3个步骤。使用该文方法对昆楚二级公路某拱桥、高海高速海口大桥、观音山大桥开展了实际的无人机三维建模和检测试验, 取得了良好的效果。

**关键词:** 无人机; 桥梁检测; 三维建模; 硬件平台配置; 航飞拍摄方案; 图像预处理

桥梁结构是一种大型的土木工程结构, 因荷载作用、疲劳与腐蚀效应、材料老化、交通量过大等原因, 安全性问题越来越突出, 如何利用方便、快速的手段和方法去检测运营桥梁的实际状况, 是中国桥梁养护部门重中之重的任务。

云南高山峡谷纵横, 特大桥、大桥众多, 部分桥墩高达数十米, 大跨径悬索桥、斜拉桥十分常见, 受地理位置和环境限制, 仅靠传统的桥梁检测车和人工搭架检测很难对桥梁进行全面检测。无人机是近年来出现的一种新型空中检测设备, 通过在无人机上安装高清摄像头、GPS、测距仪等检测设备, 利用无人机灵活、机动的优势, 可以对桥梁进行全面、高效、快捷监测, 已初步应用于各种桥梁检测项目中。然而, 目前使用无人机进行桥梁检测大多仅是利用无人机抵近桥梁拍摄高清照片, 然后通过目视判读的方式对梁板、桥墩/台、桥面等部位的裂缝、露筋、锈蚀、铺装破损等类型病害进行定性检查, 该方法仅能从照片拍摄角度对检测部位进行单一视角观察, 无法做到进一步的量化描述。文献[3]中提出依照桥梁设计图纸自动为桥梁进行三维建模, 这种类似“翻模”的思路无法真实反映桥梁的病害情况, 不能实现“所见即所得”, 仍然需要后期人工将检测数据添加至模型上进行管理和分析。

该文基于目前先进的高清实景三维模型构建技术, 系统地探讨基于无人机三维建模技术的桥梁检测

方法。基于无人机三维模型具备360°旋转和无极缩放等优势, 可以对病害进行多视角、全方位的观察, 并进行量化的点位、长度、面积、体积等要素的测量。使用该文方法在昆楚二级公路某拱桥、高海高速海口大桥、观音山大桥的桥梁检测项目中进行实际验证, 以验证其效果。

## 1 无人机硬件平台配置

针对无人机桥梁检测三维建模的特点和要求, 该文自主配置了无人机硬件平台, 如表1所示。机架选择了起降平稳的工业级四旋翼无人机机架 Eagle eye-720。此外, 由于进行高精度的桥梁三维建模需要获取拍照时准确的位置信息, 因此该文选择了 DJI A3-Pro 飞控系统, A3-Pro 飞控系统内置的 D-RTK GNSS 模块可以提供 GPS+北斗或者 GPS+GLO-NASS 组合定位, 动态定位精度可以达到厘米级, 即使在较大跨度的钢箱梁和钢拱附近等强磁干扰的环境下飞行, 也可保证卫星信号不失锁。云台选择了 DJI 禅思 Z-15 云台, 角度抖动量控制在  $\pm 0.01^\circ$  范围内, 可以确保在机身抖动的情况下拍摄出高质量的清晰照片。相机选择索尼 A7 微单相机, 有效像素 2 430 万。电池选择格氏 6S 锂电池, 容量为 18 000 mA, 续航时间最大可至 15 min。

收稿日期: 2018-06-21

基金项目: 云南省交通规划设计研究院科技项目(编号: ZL-2015-03)

作者简介: 方留杨, 男, 博士, 工程师. E-mail: fangliuyang@stwp.com

表 1 无人机桥梁检测硬件平台选择

项目	技术参数
机架	Eagle eye-720 工业级机架
飞控系统	DJIA3-Pro
云台	DJI 禅思 Z-15
相机	索尼 A7 微单相机
电池	格氏 6S 锂电池

2 无人机桥梁三维建模方法

2.1 制定航飞拍摄方案

硬件配置完成后,需要根据具体的桥梁检测任务和桥梁类型确定航飞拍摄方案,此处分为 3 种情况:

(1) 如果需要对桥面部分(如桥面铺装、伸缩缝、胀缝、标志、护栏)、锥(护)坡、梁/墩台外侧等部位进行整体检测,可以按照五视倾斜摄影的方式,分别拍摄目标范围内的前视、后视、左视、右视、下视高清照片,确保照片的航向重叠度和旁向重叠度在 75%以上,并同步记录对应的 GPS 数据。拍摄完成后进行照片质量检查,如果发现照片重叠度不足 75%,或者重点检测部位的照片拍摄质量偏低时,可再单独进行补飞拍摄。由于该方案完整覆盖了检测范围,因此可以针对整个检测范围建立出完整的三维模型。

(2) 如果需要对拱桥、悬索桥、斜拉桥的上部结构

病害(例如拱圈裂缝、悬索锈蚀程度等)进行局部重点检测,由于拱圈、拉索等结构较为复杂,难以通过五视倾斜摄影方式建立完整的三维模型。此时,可以在保证安全的前提下,单独围绕局部检测部位环绕飞行,获取多视角的照片,并同步每张照片记录对应的 GPS 数据。为了保证三维建模效果,需要确保检测部位在照片上无遗漏和死角,且每个检测点为至少在 2 张照片上出现,以实现双目立体前方交会。此外,为了保证多视角照片间的同名点匹配效果,需要确保邻接照片的重叠度在 80%以上,拍摄方位夹角在 30°内为宜。

(3) 如果需要对桥面以下结构病害(例如梁板开裂、墩柱露筋、支座脱空等)进行局部重点检测,由于桥梁下方无法获取 GPS 信号,飞行安全存在风险,因此在航飞时需要避开桥梁下方,改为以旋转云台的方式拍摄桥面下部结构的多视角照片,但该方式拍摄得到的照片倾角较大,如果在桥梁两侧分别对桥面下部结构进行拍摄,同一位置处会有较大视差,整体进行三维重建难度较大。因此,针对此类任务,三维建模需要针对桥梁两侧分别进行。具体在拍摄多视角照片时,与第二类检测任务类似,同样需要确保检测部位在照片上无遗漏和死角,每个检测点为至少在 2 张照片上出现,邻接照片的重叠度在 80%以上,拍摄方位夹角在 30°内。

表 2 总结了 3 种桥梁检测任务的航飞拍摄方案。

表 2 3 种桥梁检测任务航飞拍摄方案

检测任务	航飞方式	拍摄关键参数
桥面部分、锥(护)坡、梁/墩台外侧等部位整体检测	前、后、左、右、下五视倾斜摄影方式飞行	航向重叠度:75%以上;旁向重叠度:75%以上
复杂上部结构局部重点检测	围绕局部检测部位环绕飞行	照片无遗漏和死角,每个检测点在 2 张照片上出现,邻接照片重叠度:80%以上,拍摄方位夹角:30°以内
桥面以下结构局部重点检测	避开桥梁下方,围绕局部检测部位环绕飞行,以旋转云台方式拍摄照片	

2.2 图像预处理

无人机在抵近桥梁(特别是桥梁下沿)拍摄照片时,通常存在曝光度不足的问题,并且三维建模需要从多个角度对桥梁进行拍摄,在某些情况下各角度照片的光照条件差异较大,照片的色调、亮度、对比度等都会存在差异。为了给后续三维建模提供高质量的照片,需要首先进行图像预处理。直方图匹配通过累积分布函数计算两幅图像直方图之间的强度映射关系,对原始图像的强度进行调整,使其直方图与参考图像直方图相近,从而解决同一场景在不同光照情况中获

得的两幅图像之间的强度差异性问题。直方图匹配首先计算原图  $I'$  的直方图  $H'$  和参考图像  $I$  的直方图  $H$ ;其次,计算各自的累计分布函数  $F'$  和  $F$ ;然后,对于参考图像直方图中任一强度值  $g \in [0, 255]$ ,在原图像直方图中确定一个与其对应的强度值  $g'$ ,使其满足式(1),并且  $g' \in [0, 255]$ ;最后,构建直方图强度映射关系  $M(g')=g$ ,并采用该映射关系调整原图像每一个像素处的像素值,从而将两张图像的色调调节至近似一致。

$$|F(g)-F'(g')|=\min_k |F(g)-F'(k)| \quad (1)$$

图 1(a)为使用无人机从不同角度分别拍摄的某高速公路连续 T 梁桥的梁底照片,可以发现,两张照片的色调、亮度差异较大。图 1(b)为经过直方图匹配处理后的结果,可以发现两张照片的色调和亮度已基本调至一致,可满足后续进行三维立体重建的要求。

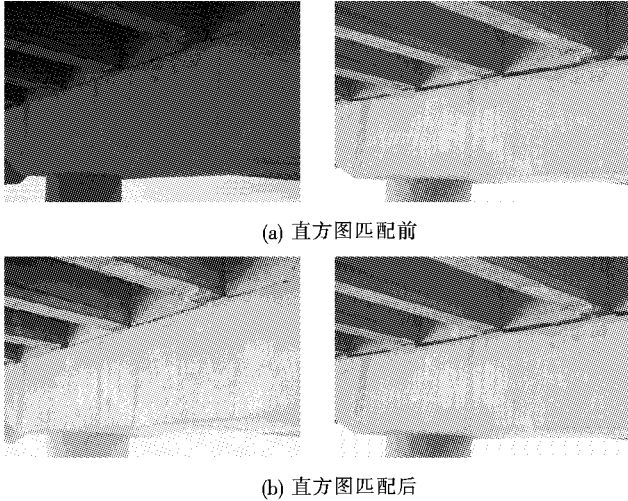


图 1 直方图匹配前后某高速公路连续 T 梁桥梁底照片

### 2.3 三维立体重建

三维立体重建是一种集合空间/近景摄影测量和计算机视觉技术,用于构建地面三维空间信息的方法,主要步骤包括:多视图像联合空中三角测量、密集匹配点云生成、Delaunay 三角网构建、纹理贴图。

多视图像联合空中三角测量使用共线方程构造从像点到物体点的直线,通过模型光线束在空间的旋转和平移,实现模型之间公共光线的最佳交会。然后,基于上一步空中三角测量后得到的多视点立体影像,通过密集匹配方法(例如物方面元最小二乘的批多视立体匹配方法、半全局立体匹配方法等)提取多视点立体影像中的同名像点,使用共线方程求解同名像点的空间三维坐标  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$ ,从而生成具有真实坐标信息的密集点云。如图 2 所示,  $A$  为桥面点,  $O_1$ 、 $O_2$ 、 $O_3$  为摄影中心,  $A_1$ 、 $A_2$ 、 $A_3$  为桥面点  $A$  在多视点立体影像中的同名像点,通过共线方程即可确定桥面点  $A$  的空间三维坐标。共线方程如下式所示:

$$\begin{cases} x - x_o = -f \frac{a_1(X - X_s) + b_1(Y - Y_s) + c_1(Z - Z_s)}{a_3(X - X_s) + b_3(Y - Y_s) + c_3(Z - Z_s)} \\ y - y_o = -f \frac{a_2(X - X_s) + b_2(Y - Y_s) + c_2(Z - Z_s)}{a_3(X - X_s) + b_3(Y - Y_s) + c_3(Z - Z_s)} \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $x$ 、 $y$  为像点的像平面坐标,  $x_o$ 、 $y_o$ 、 $f$  为影像内方位元素,  $X_s$ 、 $Y_s$ 、 $Z_s$  为摄影点的三维空间坐标,  $X$ 、 $Y$ 、

$Z$  为桥面点的三维空间坐标,  $a_i$ 、 $b_i$ 、 $c_i$  ( $i=1, 2, 3$ ) 为影像的 3 个外方位角元素(俯仰角、翻滚角、偏航角)组成的 9 个方向余弦。

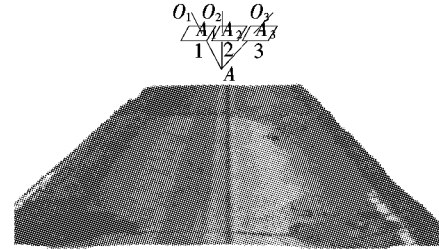


图 2 桥面点三维立体重建示意图

之后,基于密集匹配点云构建 Delaunay 三角网, Delaunay 三角网具有的空圆特性和最大最小角特性保证其不会出现过于狭长的三角形,确保了构网过程的准确合理。最后,从与每个三角网的坐标和方位最一致的照片中获取纹理信息并映射至三角网上,完成三维立体重建工作。

目前, Pixel4D、ContextCapture、DP-Modeler 等商业软件都可以通过高度自动化的半交互方式,实现无人机影像三维立体重建。重建过程的大部分操作都由软件自动完成,大大降低了无人机三维建模的专业难度。为了确保重建成功率,提高重建效果,用户还需要进行控制点、像片连接点、以及部分重建参数(如重建范围、格网大小、纹理精细程度)的选择,确保最终的建模效果可以满足实际需求。

## 3 基于三维模型的桥梁检测应用实例

利用无人机三维模型可以实现任意方向旋转和无极缩放的特点,从多视角、多尺度对桥梁病害进行检测,有效弥补了从单张照片中进行目视判读检测时视角偏差、死角、模糊等问题,显著提高了桥梁检测的准确性和效率。该文选择昆楚二级公路某拱桥、高海高速海口大桥、观音山大桥开展了基于无人机三维模型的桥梁检测试验验证工作。

### (1) 昆楚二级公路某拱桥

昆楚二级公路某拱桥位于楚雄州禄丰县长田村附近,为钢筋混凝土拱桥,全长 151 m。该文采用五视倾斜摄影的方式,分别获取了 29 张前视照片、31 张后视照片、18 张左视照片、16 张右视照片、40 张下视照片,照片间重叠度约 80%;并在拱肋、拱脚部位处加密拍摄了 16 张照片,合计 150 张,建立了完整的拱桥三维模型,如图 3 所示。在三维模型上可以方便地对桥面

铺装、伸缩缝、标志、梁/墩台外侧等部位进行检测。进一步地,由于无人机作业时每张照片都获取了高精度GPS信息,且通过空中三角测量对照片外方位元素进行了平差解算,因此三维模型具有可量测性,对昆明至楚雄方向13#伸缩缝进行量测,得到该部位的宽度为7.17 cm,实地量测宽度为7.25 cm,两者误差0.08 cm,说明三维模型的量测精度可以基本满足桥面部分检测需求。若对该伸缩缝的不同部位进行量测和分析,并与设计和施工资料进行比对,则可对其变形情况进行定量评价。

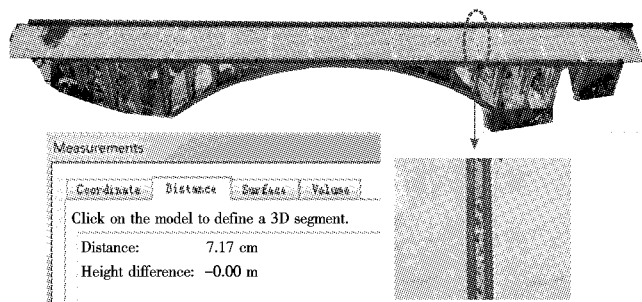


图3 昆楚二级公路某拱桥无人机三维模型及伸缩缝检测示意

### (2) 高海高速海口大桥

高海高速海口大桥位于昆明市西山区海口镇附近,为三跨中承式钢管混凝土系杆拱桥,全长756 m。进行主拱圈外观检查时,传统方式为检测人员系安全绳沿梯攀爬检查,该方式检测效率较低,作业安全存在风险。无人机作业时,围绕主拱圈旋转拍摄了97张多视角高重叠图照片,建立了主拱圈三维模型,有效提高了对主拱圈检查的效率,避免了人工检测带来的安全风险。图4为主拱圈局部无人机三维建模成果,在三维模型上对主拱圈吊杆锚头进行周长和面积量测,其值分别为1.76 m和0.19 m<sup>2</sup>,与实地量测值(周长1.73 m、面积0.18 m<sup>2</sup>)基本相同,说明三维模型可以满足对复杂上部结构局部重点检测的需求。

### (3) 高海高速观音山大桥

高海高速观音山大桥位于昆明市西山区观音山村附近,为预应力混凝土连续T形梁桥,全长737 m,受长期交通负载过大的影响,出现部分支座脱空等病害。前期公路养护部门已使用桥梁检测车开展了梁底和支座检查工作。无人机作业时,围绕桥面下方病害部位,通过旋转云台的方式进行多角度拍摄,获取了52张多视角高重叠度照片,其拍摄方位(经过空中三角测量处理后照片摄影点的空间位置和角度)和三维建模概略视图(通过密集匹配生成的全局概括浏览模型点)如图5所示。

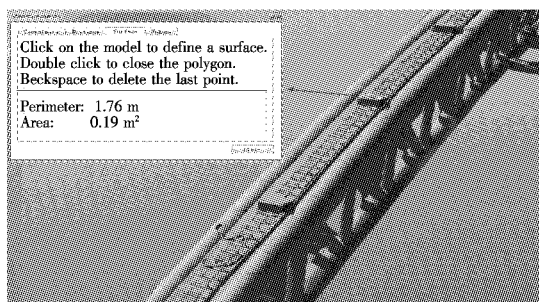


图4 主拱圈局部无人机三维模型及吊杆锚头量测示意

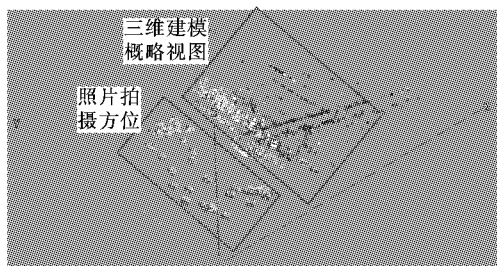


图5 无人机照片拍摄方位和三维建模概略视图

桥面下方病害部位三维模型如图6所示。在三维模型上定位支座脱空位置,并对脱空高度进行量测,得到高度值为1.49 cm,与人工检测(1.50 cm)结果基本相同(图7),说明三维模型可以满足对桥面以下结构局部重点检测的需求。

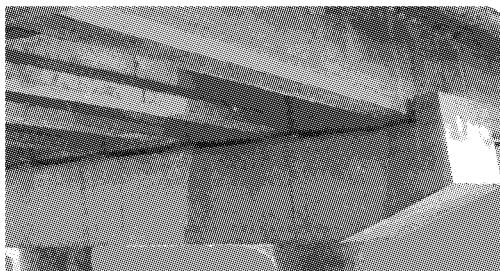


图6 桥面下方病害部位三维模型

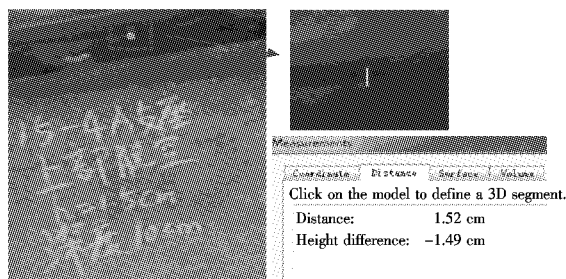


图7 桥面下方支座脱空高度量测

## 4 结语

该文提出了一种基于无人机三维建模技术的桥梁

# 飞燕式钢管混凝土系杆拱桥静动力特性分析

张振伟, 张伟

(中国市政工程中南设计研究总院有限公司, 湖北 武汉 430000)

**摘要:** 该文以飞燕式钢管混凝土系杆拱桥为研究对象, 利用有限元软件 Miads/Civil 建立空间分析计算模型, 进行静、动力特性及稳定性分析。主要研究了拱肋在正常使用极限状态和承载能力极限状态下的受力状况、系杆在各个施工阶段张拉力的确定及成桥后混凝土收缩徐变对拱肋位移的影响。分析了该桥的结构自振频率和振型特征。结果显示: 该桥的稳定系数满足规定要求。

**关键词:** 飞燕式系杆拱; 静动力特性; 稳定性

随着建筑材料的发展和人们对审美观念的提升, 极大地带动了拱桥形式的发展。拱桥具有造型优美、跨越能力大、结构轻巧等优点, 广泛应用于城市景观桥的建设中。其中, 飞燕式钢管混凝土系杆拱桥更是在造型上富有时代气息, 充分体现了刚与柔、力与美的完美融合。钢管混凝土的基本原理是: 利用外侧的钢管对灌注在管内的核心混凝土起到套箍作用, 使钢管内核心混凝土处于三向受压状态, 从而提高核心混凝土抗压强度的能力。但是和国外钢管混凝土结构的拱桥发展相比, 中国起步相对较晚, 还有待进行更深入的研究。该文采用大型有限元软件 Miads/Civil 2012 建立

钢管混凝土系杆拱桥结构计算分析模型, 主要对其拱肋受力及位移、系杆张拉力、混凝土收缩徐变、自振特性和稳定性进行分析。

## 1 工程概况

江西九江秋湖里大桥为飞燕式钢管混凝土系杆拱桥, 桥梁全长 250 m, 其主梁跨径为 (45+160+45) m, 如图 1 所示。主拱桥面以上采用钢管混凝土拱肋, 主跨矢跨比为  $F/L = 1/4$ ; 西侧边跨矢跨比为  $F/L = 1/9.544$ , 东侧边跨矢跨比为  $F/L = 1/10$ 。主孔拱肋

检测方法。首先, 针对无人机桥梁检测工作的特点自主配置了无人机硬件平台。然后, 根据具体的桥梁检测任务和桥梁类型确定了 3 种航拍方案, 最后, 详细阐述了无人机图像预处理和三维立体重建的流程和方法。使用该文方法对昆楚二级公路某拱桥、高海高速海口大桥、观音山大桥开展实际的无人机三维建模和桥梁检测验证, 取得了良好的效果。

## 参考文献:

- [1] 邹露鹏, 范钟倩. 微型无人机在公路桥梁养护检测工程中的应用[J]. 公路, 2017(7).
- [2] 张玉玲, 杨志强. 桥梁无人机检测及加固技术研究[J]. 公路交通科技: 应用技术版, 2017(3).
- [3] 许宏元. 无人机在桥梁检测中的应用[J]. 中国公路, 2017(10).

- [4] Morovic J, Shaw J, Sun P. A Fast Non-Iterative and Exact Histogram Matching Algorithm[J]. Pattern Recognition Letters, 2002, 23(1): 127-135.
- [5] 靳珍璐, 潘泉, 赵春晖, 等. 基于局部精确直方图匹配的无人机景象匹配导航色彩恒常算法[J]. 中国惯性技术学报, 2015(5).
- [6] 张剑清, 潘励, 王树根. 摄影测量学[M]. 2 版. 武汉: 武汉大学出版社, 2009.
- [7] 潘一凡, 张显峰, 童庆禧, 等. 公路路面质量遥感监测研究进展[J]. 遥感学报, 2017(5).
- [8] 余杰, 吕品, 郑昌文. Delaunay 三角网构建方法比较研究[J]. 中国图像图形学报, 2010(8).
- [9] 陈显龙, 陈晓龙, 赵成, 等. 无人机在路桥病害检测中的设计与实现[J]. 测绘通报, 2016(4).
- [10] 李成涛, 章世祥. 基于 BIM 技术的桥梁病害信息三维可视化研究[J]. 公路, 2017(1).

收稿日期: 2018-06-10

作者简介: 张振伟, 男, 工程师, E-mail: 1036321395@qq.com