

# 三维重建模型在桥梁表观缺陷检查中的应用

许广利<sup>1</sup>,李绍勇<sup>1</sup>,唐军<sup>1</sup>,刘书其<sup>1</sup>,周银<sup>2</sup>

(1.云南昆楚高速公路投资开发有限公司,云南昆明 650100;2.重庆交通大学 土木工程学院,重庆市 400074)

**摘要:**针对桥梁表观缺陷检查过程中存在效率低、精度差、缺陷无法精确三维定位的问题,该文提出一种基于三维重建模型的桥梁表观缺陷检查方法。以室内矩形梁为对象,建立桥梁三维模型并验证其精度,然后基于该模型导出的点云数据,采用Python编写程序,实现桥梁表观缺陷的识别、测量与参数导出。以云南省昆明市大德大桥为背景,进行全流程项目应用,结果表明:使用该方法能够着重解决桥梁表观缺陷自动化检测和定位问题,显著提升检查效率与可视化、自动化程度,具有良好的应用前景。

**关键词:**桥梁工程;三维重建;表观缺陷检查;点云;缺陷空间定位

**中图分类号:**U446

**文献标志码:**A

## 0 引言

截至2021年底,中国公路桥梁达到96.11万座<sup>[1]</sup>。在其为人们带来交通便利的同时,桥梁设施的施工与检测维护也变得尤其重要。由于设计缺陷、材料性能不足、施工不当<sup>[2]</sup>等原因,混凝土结构将无法避免地出现各种诸如破损、裂缝的表观缺陷。随着时间的发展,这些表观缺陷将进一步劣化,直至对桥梁结构产生危害。因此在桥梁施工至服役周期内,对桥梁表观缺陷的检测是保证其结构安全的重要预防性工作。然而,目前工业界使用较多的表观缺陷检测方法仍是人工检查辅以桥梁检测车的方式,该方法效率低、精度差,可追溯性差,在愈加繁重的桥梁检测任务中已经不再适用。基于此,众多研究者开始致力于新型智能检测方法的研究。

早在2010年前后,摄影测量技术便逐渐开始应用于桥梁结构变形监测中。刘海源<sup>[3]</sup>提出使用Matlab模拟摄影测量的二维线性变换,实现了利用非量测相机图像测量桥梁裂缝宽度变化的目的,其试验结果与全站仪测量结果相当;随着摄影测量理论的深入,李海洋<sup>[4]</sup>引入了多线程置信引导技术,改进了两

台相机对混凝土结构进行形变测量的精度;张松雷<sup>[5]</sup>使用单反相机,通过DLT算法对桥梁线形监控点坐标进行转换,实现了桥梁线性监测。随着数字图像处理技术的进步和桥梁检测要求的提高,使用图像进行缺陷检测成为众多学者的研究方向。文献[6-7]将BIM与摄影测量技术结合,使用影像建立桥梁三维模型用于病害检测,并将病害信息与BIM模型整合,是一次桥梁运维管养信息化与可视化的优秀尝试;高俊祥<sup>[8]</sup>提出将无人机获取的桥梁表观图像进行拼接形成全景图,并使用图像处理算法和神经网络技术进行病害提取的方案,大大提高了桥梁检测的自动化程度;文献[9-12]改进了各类人工智能、迁移学习方法进行混凝土图像的处理,应用于混凝土表面缺陷的检测工作,也取得了较好的研究成果。

总体来讲,基于图像处理技术的混凝土结构物检测方法研究已成为工程领域一个重要的研究方向,摄影测量技术的发展更是将其从二维转向三维,具有广阔的应用前景。但目前为止,无论是传统检测方法<sup>[12]</sup>,还是各类新型智能检测方法,仍面临着技术方案的改进与发展,主要存在以下问题:①表观缺陷不能准确定位。大多数研究成果聚焦于某种特定

收稿日期:2022-02-18(修改稿)

基金项目:云南省交通运输厅科技创新示范项目(编号:云交科教[2018]46号)

作者简介:许广利,男,硕士,高级工程师.E-mail:1570365944@qq.com

缺陷(如裂缝)的检测算法开发,以期提高其检测精度和准确度,能够获取缺陷本身的几何信息,却无法得到其相对于桥梁整体的准确位置信息,也就无法以此为数据基础对桥梁结构状态进行评判;② 缺少缺陷信息与桥梁结构的信息整合。检测数据多数以纸质报告或单张照片的形式体现,可视化程度不高,不能与缺陷存在的真实结构进行关联。

本文基于三维重建技术,结合规范对于桥梁外观检测的要求,提出融合三维重建的桥梁表观病害的检测、量测与定位方法,通过室内试验与项目应用验证该方法的精度和实用性,以解决桥梁表观检测方法中病害无法精确定位、数据不能结构化整合的两大难题,为桥梁检测信息化发展提供新思路。

## 1 技术流程

### 1.1 基本原理

三维模型重建用于表观缺陷检测,关键在于确定图像坐标系内像点坐标 $a(x,y)$ 与空间坐标系内对应物点坐标 $A(X_A, Y_A, Z_A)$ 的变换关系,进而计算出图像上像点 $a(x,y)$ 的三维空间坐标 $A(X_A, Y_A, Z_A)$ ,再使用其色彩信息进行缺陷检测。本文采用直接线性变换<sup>[8]</sup>来计算二者的对应关系。其表达式如下:

$$\begin{cases} x + \frac{X_A l_1 + Y_A l_2 + Z_A l_3 + l_4}{X_A l_9 + Y_A l_{10} + Z_A l_{11} + l_1} = 0 \\ y + \frac{X_A l_5 + Y_A l_6 + Z_A l_7 + l_8}{X_A l_9 + Y_A l_{10} + Z_A l_{11} + l_1} = 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中: $l_i(i=1,2,\dots,11)$ 为11个变换参数,直接线性变换解法的本质是根据共线条件方程演算得到<sup>[5]</sup>,计算过程是:① 先通过不少于6个控制点即可解算出变换参数 $l_i(i=1,2,\dots,11)$ ;② 将像点坐标带入表达式,计算物方空间坐标;③ 按照最小二乘法不断迭代,最终解算出符合误差范围的空间坐标 $A(X_A, Y_A, Z_A)$ 。该方法的好处是不需要外方位元素的初始值,且可以直接使用原始观测像点坐标<sup>[3-6]</sup>,因此无需使用量测相机采集影像,大大降低了测量成本,扩展了应用范围。

在像点坐标 $a(x,y)$ 与空间坐标系内对应物点坐标 $A(X_A, Y_A, Z_A)$ 转换关系确定以后,通过两张图像中相同像点间的视差,即可反推出场景中任意特征点的空间姿态与位置<sup>[13]</sup>,为桥梁表观缺陷检测提供

准确的数据基础,如图1所示。

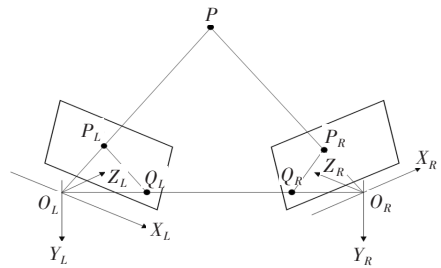


图1 三维重建示意图

### 1.2 技术流程

基于三维重建理论,借助图像建立桥梁三维模型,并利用模型点云的色彩与坐标信息,提出了表观缺陷检测与定位的技术流程,具体包含以下步骤:

(1) 数据采集与模型建立:使用数码相机、无人机等设备,按照重叠度<sup>[14]</sup>要求采集桥梁多视影像数据,建立桥梁三维模型,并进行比例尺校正。

(2) 点云导出与分块:将三维模型分解成点云模型,并导出至Python,依据坐标准则进行分块。

(3) 缺陷检测:在每一点云块中,基于点云的色彩信息(RGB),使用优化的Canny边缘检测算子<sup>[15-17]</sup>提取缺陷所在的“兴趣点”集合 $T$ 。

(4) 参数提取:在集合 $T$ 中,基于其几何特征,使用图像处理算法<sup>[18]</sup>计算缺陷所在点云的几何参数,包括长度 $L$ 、宽度 $W$ 和面积 $S$ ;提取集合 $T$ 中各点的坐标参数,并与其几何参数进行整合。

(5) 缺陷检测结果可视化:利用提取的缺陷参数,在三维模型上进行标记;同时自动绘制其平面展开图,完成工程应用。其技术方法和流程如图2所示。

## 2 模型建立与精度验证

考虑到桥梁检测现场环境的复杂性,多数情况下无法设置足够的控制点和检验点,其建模精度未得到有效验证,本文设计了矩形梁室内试验来进行缺陷检测的精度验证。

试验测量对象为带裂缝矩形截面钢筋混凝土梁,其截面尺寸为1 700 mm×150 mm×250 mm。依据1.2节的技术流程,本文使用普通数码相机采集了试验梁的多视影像数据,引入3D建模软件Agisoft Photoscan建立梁三维模型<sup>[19]</sup>。

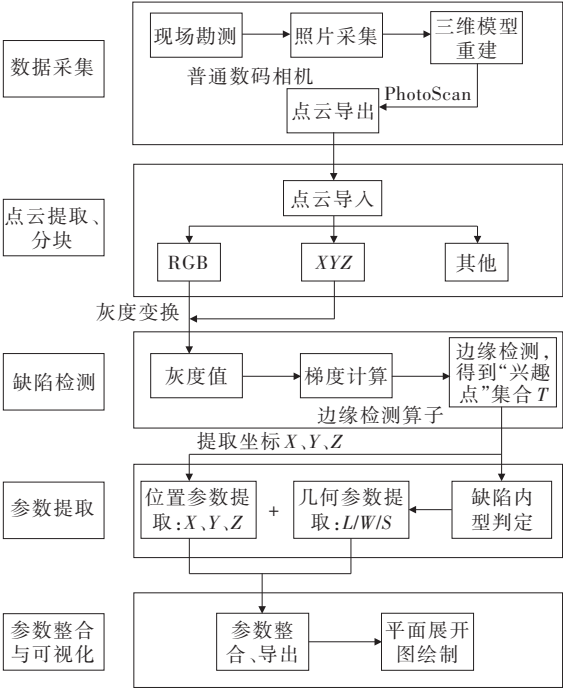


图2 桥梁缺陷检测与定位技术路线

2.1 比例尺校正

使用软件自动解算的三维模型,由于没有设置控制点和校验点,其空间比例尺与实际结构有较大误差,精度上无法满足桥梁检测的测量要求。本文选取梁体3个顶点作为“控制点”、设计几何长度作为比例尺,建立新的参照系对模型几何参数进行校正。

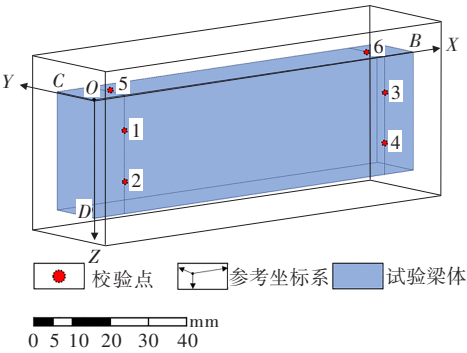
如图3(a)所示,分别选取梁表面4点:O、B、C、D,建立坐标系O-XYZ,用设计梁参数为各坐标点赋值,重新对齐,以校正梁体模型比例尺。各坐标值参数如表1所示。经过细节修改、编辑,最终得到三维模型[图3(b)]。

2.2 精度分析

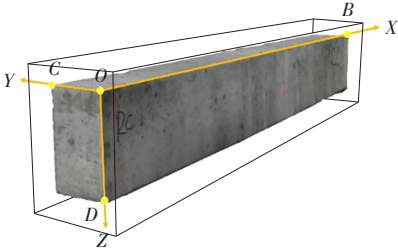
理想情况下,上述方法建立的三维模型应与真实矩形梁在几何形状、尺寸上具有高度一致性<sup>[15]</sup>,但实际操作过程中,由于数据采集方式和计算过程的区别,不可避免地会产生误差。为检验使用三维重建模型进行桥梁检测的精度是否满足检测要求,本文在矩形梁表面设置了6个校验点[图3(a)所示]:使用激光扫描仪测量其坐标值,并转换到同一坐标下,与三维模型中提取的坐标值进行对比分析。

经测量计算,选取的6组检验点中,X、Y、Z方向平均误差(绝对值)分别为3.538 5 mm、2.397 7 mm、3.666 7 mm,相对于矩形截面梁截面尺寸,X、Y、Z各

方向误差百分比分别为:0.21%、1.6%、1.47%。表2为检验点误差统计。表2结果表明:在试验室条件下,模型表面定位精度达到毫米级,完全满足桥梁表面缺陷检测的精度要求。



(a)比例尺校正与检验点选择



(b)梁体三维模型

图3 模型比例尺校正与精度检验

表1 标记点坐标赋值

特征点编号	X/m	Y/m	Z/m
O	0.000 000	0.000 000	0.000 000
B	1.700 000	0.000 000	0.000 000
C	0.000 000	0.150 000	0.000 000
D	0.000 000	0.000 000	0.250 000

表2 检验点误差统计

检验点 编号	误差/mm			
	X	Y	Z	综合误差
1	-1.314	1.774	-3	3.725
2	-3.425	-1.937	-8	8.915
3	-1.875	4.252	6	7.589
4	-5.413	-2.841	-5	7.898
5	-2.341	2.159	3	4.375
6	-3.863	-1.423	6	7.277
均值	-3.038	0.331	-0.167	—
标准差	1.371	2.552	5.459	—

### 3 桥梁表观缺陷检查

众多利用图像进行缺陷检测的文献中<sup>[10-11,16-18]</sup>,其主要研究内容是对单张图像中的表观缺陷进行识别、测量:将图像视为空间域内的无穷多个像素点组成,通过各个像素点之间的色彩差异,使用数学方法将“兴趣像素”与背景像素区分开,并计算出“兴趣像素”集合的几何参数,即为梁体表观缺陷的几何信息(包括长度、宽度、面积等)。但该方案仅能够获得较为准确的缺陷几何参数,其三维空间位置参数却难以得到;即便将同视角多张照片拼接后进行缺陷定位,也仅能够计算得到缺陷粗略的二维相对位置。这种限制给后续的桥梁状况评估带来了阻碍,使得通过图像得到的缺陷几何信息失去了最终价值。

而通过三维重建得到的梁体三维模型,不仅附带纹理与色彩,同时也解算出了各个点的三维坐标,这就为表观缺陷的三维空间定位打通了技术路线。本文在此基础上,提出以三维重建模型为数据基础进行表观缺陷的识别与量测的方法,不仅可以自动识别出多类表观缺陷,并能在识别的同时提取该缺陷的空间位置参数,为桥梁健康状况的评估采集了全面准确的数据。

#### 3.1 缺陷识别与测量

本文利用解算得出附带的色彩和空间坐标的点云,使用Python编程来实现缺陷的识别,其具体步骤如下:

(1) 点云导出与信息读取。将模型点云从建模软件中导入至Python中并读取,此时每个点包含其颜色( $R$ 、 $G$ 、 $B$ 值)和位置信息( $X$ 、 $Y$ 、 $Z$ 值);分别以 $X$ 、 $Y$ 、 $Z$ 坐标为主准则,将模型点云分为不同的块。

(2) 灰度化。各块中,按照主准则坐标的递增,遍历所有点,用加权平均法计算每个点的灰度值:

$$G(i, j) = \mu(R) \cdot R(i, j) + \mu(G) \cdot G(i, j) + \mu(B) \cdot B(i, j) \quad (2)$$

式中: $G$ 为点 $(i, j)$ 的灰度值; $R(i, j)$ 、 $G(i, j)$ 、 $B(i, j)$ 分别为点 $(i, j)$ 的 $R$ 、 $G$ 、 $B$ 值; $\mu(G)$ 、 $\mu(R)$ 、 $\mu(B)$ 为权重,分别取0.587、0.299、0.114<sup>[7]</sup>。

(3) 计算灰度梯度<sup>[10]</sup>:

$$\begin{cases} \nabla_i = G(i+1) - G(i) \\ \nabla_j = G(j+1) - G(j) \\ \nabla = \sqrt{\nabla_i^2 + \nabla_j^2} \end{cases} \quad (3)$$

式中: $G$ 为点 $(i, j)$ 的灰度值; $\nabla$ 即为该点的梯度。

(4) 边缘检测。遍历点云中的点,使用Canny边缘检测算子<sup>[16]</sup>提取出“兴趣点”保留,将其余像素点的灰度值置为0,即可提取出缺陷所在像素点集合 $T$ 。其伪代码如下:

```
Import clond points A(i, j)
For x in (0, i);
    For y in (0, j);
        Extract R(i, j)\G(i, j)\B(i, j);
        G(i, j) = μ(R)*R(i, j) + μ(G)*G(i, j) + μ(B)*B(i, j);
        Delta(i) = G(i+1) - G(i); Delta(j) = (j+1) - G(j);
        Delta = math.sqrt[Delta(i) + Delta(j)];
    edge = cv2.Canny[image(i, j)]
Else end
If A(i, j) is an edge point,
    G(i, j) = G(i, j);
Else
    G(i, j) = 0;
End
```

(5) 几何特征测量。在识别出缺陷所在像素后,其几何参数(长度、宽度、面积)均可被计算:面积测量使用“连通域”方法,计算缺陷所在像素点个数<sup>[17]</sup>,再按照图像尺寸与分辨率的数学关系推算实际面积;长度计算采用外接矩形法<sup>[18]</sup>,用缺陷所在连通域的对角线长度作为缺陷的长度值;通过计算缺陷两侧边缘线之间的垂直距离的均值<sup>[20]</sup>,可以得到缺陷的宽度值。在缺陷的各项参数计算完毕后,可将其导出至外部数据库。

以试验梁为例,使用上述程序依次进行处理,其处理效果见图4(a)、(b)、(c):将模型点云导出至Python,选取 $Y$ 轴坐标为0的所有点云(即梁体缺陷最为明显的 $XOZ$ 平面),通过计算该块点云上各个点的灰度梯度,使用边缘检测算子提取出灰度较大的“兴趣点”,即为混凝土裂缝、破损等缺陷所在。



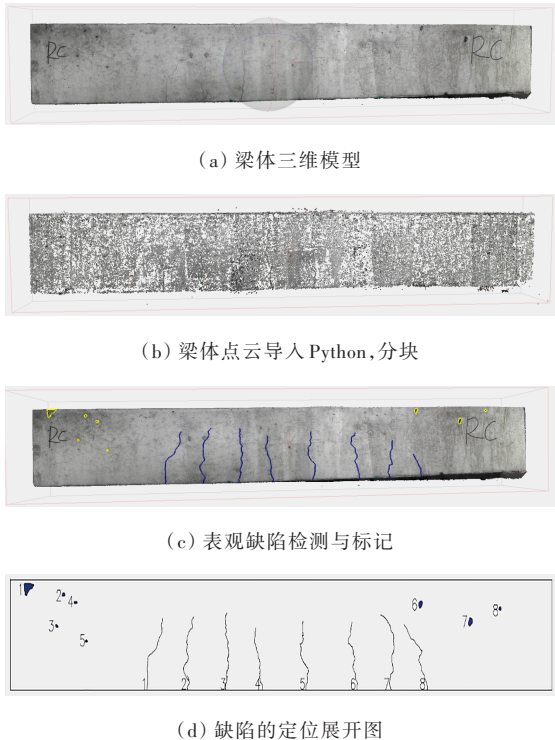


图 4 试验梁表观缺陷识别与定位

3.2 缺陷定位与标记

在提取出“兴趣点”后,读取“兴趣点”所在像素

对应的坐标值  $P(X,Y,Z)$ ,即为表观缺陷的空间三维坐标;同时将“兴趣点”的  $R、G、B$  值设为特定数值,如红色为  $(255,0,0)$ ,即可将缺陷在模型背景中清晰地标记出来;将“兴趣点”坐标数据导出至 Excel,即可在 CAD 中自动绘制梁体表面缺陷平面图,如图 4(c)、(d)所示。

表 3 为从上述方法提取的梁体表面缺陷几何参数,长度  $L$ 、宽度  $W$ 、面积  $S$  以及其起始坐标、中心点坐标等重要参数都可以直接导出。

4 项目应用

为验证上述方法的可行性,本文在云南省昆明市禄丰县大德大桥的表观检测中进行了项目应用。大德大桥位于国家高速公路网昆明至楚雄高速公路岷山—广通段,跨越成昆铁路,主桥设计为  $2\times 65\text{ m}$  的 T 形刚构大悬臂转体桥,转体前后桥梁体系变化、内部受力形态复杂,易出现施工质量问题。为确保其服役后的安全性,在转体施工后,对其进行了表观缺陷检查,以保证后期运营安全。

表 3 梁体表面缺陷导出统计数据

缺陷类型	编号	几何参数		中心点坐标/起始点坐标
混凝土 破损	1	$S=524.78$		$(0.052\ 967,0.000\ 000,0.064)$
	2	$S=173.45$		$(0.167\ 857,0.000\ 000,0.074)$
	3	$S=154.22$		$(0.145\ 293,0.000\ 000,0.133)$
	4	$S=161.23$		$(0.203\ 989,0.000\ 000,0.091)$
	5	$S=158.86$		$(0.239\ 220,0.000\ 000,0.159)$
	6	$S=268.75$		$(1.285\ 963,0.000\ 000,0.090)$
	7	$S=401.23$		$(1.444\ 962,0.000\ 000,0.123)$
	8	$S=102.21$		$(1.535\ 616,0.000\ 000,0.100)$
混凝土 裂缝	1	$L=0.193\ 761$	$W=0.32$	$(0.428\ 987,0.000\ 000,0.248),(0.479\ 419,0.000\ 000,0.122)$
	2	$L=0.204\ 873$	$W=0.38$	$(0.556\ 635,0.000\ 000,0.250),(0.578\ 587,0.000\ 000,0.115)$
	3	$L=0.192\ 105$	$W=1.20$	$(0.678\ 077,0.000\ 000,0.250),(0.673\ 888,0.000\ 000,0.120)$
	4	$L=0.162\ 036$	$W=0.70$	$(0.790\ 268,0.000\ 000,0.249),(0.768\ 757,0.000\ 000,0.140)$
	5	$L=0.178\ 543$	$W=0.30$	$(0.926\ 452,0.000\ 000,0.246),(0.917\ 714,0.000\ 000,0.135)$
	6	$L=0.173\ 859$	$W=0.38$	$(1.087\ 727,0.000\ 000,0.247),(1.071\ 343,0.000\ 000,0.141)$
	7	$L=0.141\ 002$	$W=0.30$	$(1.195\ 606,0.000\ 000,0.250),(1.204\ 047,0.000\ 000,0.166)$
	8	$L=0.081\ 054$	$W=0.20$	$(1.307\ 119,0.000\ 000,0.250),(1.277\ 623,0.000\ 000,0.203)$

注:表中  $S、L、W$  的单位分别为  $\text{mm}^2、\text{mm}、\text{mm}$ ;混凝土破损记录中心点坐标、混凝土裂缝记录起始点坐标单位均为  $\text{m}$ 。下同。

使用普通数码相机和无人机融合摄影方案进行桥梁施工现场的影像采集,相机型号为 NIKON

COOLPIX P900s,无人机为大疆精灵 Phantom 4,相机最大分辨率为 6 400 万像素,83 倍光学变焦镜头,

可以保证 20 m 距离内能够获得梁体表面清晰纹理信息,按照 1.2 节所述,建立大德大桥施工质量检查三维模型,如图 5 所示。

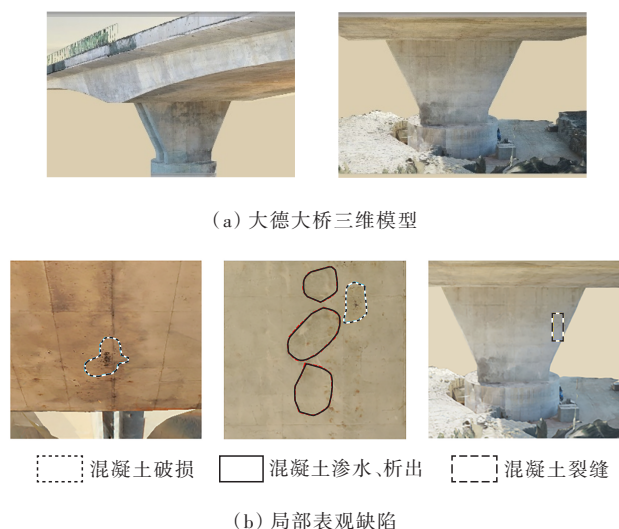


图 5 大德大桥表面缺陷图

依据设计资料,利用 2.1 节所述方法,选取关键控制点对桥梁结构的空比例尺进行校正;然后将模型导出成点云,使用 3.1 节方法对桥梁表面缺陷进行识别与标记,并自动测量其空间位置和几何参数;最后,将得到的详细参数导出至 Excel 数据库。限于篇幅,部分检测结果如表 4 所示。

表 4 大德大桥施工缺陷统计(部分)

缺陷部位	缺陷类型	缺陷位置描述	几何参数
梁	混凝土麻面	0.23 m	$S=0.865\ 4$
	混凝土破损	0.45 m	$S=0.068\ 7$
		11.22 m	$S=0.003\ 2$
		45.23 m	$S=0.045\ 2$
	混凝土渗水、结晶	45.40 m	$S=0.098\ 5$
		45.62 m	$S=0.050\ 3$
墩、柱	混凝土裂缝	距墩底 3.4 m	$L=0.210\ 0$ $W=0.000\ 2$

注:缺陷位置为该缺陷中心位置与 T 梁东向起点的距离。

由表 4 可知:发现并标记 7 处混凝土表面缺陷,其空间位置、几何尺寸均可被记录和存档。

本次数据采集工作实际工时 3 h,内业建模与处理共 3.5 h,共采集影像 1 635 张,建立了大德大桥实景三维模型。相较于传统桥梁表面检查过程,本文采用的方法能够获得桥梁表面全方位的结构化模型,并能对施工缺陷进行精准定位、准确测量,其测

量数据可以自动导出;且建立的三维模型可作为后续维护管理的可视化数据基础,对桥梁全生命周期的智慧管理具有深远意义。

## 5 结语

本文基于三维重建技术,提出一种基于三维重建模型的桥梁表面缺陷检查方法,并验证该方法的精度要求;利用模型点云的坐标与 RGB 信息,使用 Python 编写程序,提取试验梁表面裂缝与破损的几何尺寸和三维空间坐标,并自动绘制其二维展开图和三维标注,实现其三维模型与表面缺陷的信息整合与可视化展示。

室内试验与项目应用证明,该方法具有如下优势:① 检测精度高:对缺陷的定位精度可达毫米级,误差百分率不超过 2%,完全满足缺陷检查的定位精度要求;② 快速提取缺陷位置信息:使用本文提出的方法能够快速提取缺陷的几何位置信息,解决表面检测的另一重要工作;③ 可视化程度高:采用该方法输出的桥梁三维模型、二维展开图,可为全生命周期的溯源提供直观的数据基础。

实践表明:该方法能够有效解决桥梁表面缺陷检查时的便捷性、准确性、全面性问题,准确提取缺陷几何信息的同时,能够精确定位其空间位置,为后续桥梁健康状况评价提供数据基础,为桥梁全生命周期的追溯和管理提供信息载体。

## 参考文献:

- [1] 交通运输部. 2021 年交通运输行业发展统计公报[J]. 交通财会, 2021(6): 92-97.
- [2] 贺拴海, 赵祥模, 马建, 等. 公路桥梁检测及评价技术综述[J]. 中国公路学报, 2017, 30(11): 63-80.
- [3] 刘海源. 非量测数码相机近景摄影测量技术在工程中的应用[D]. 重庆: 重庆大学, 2011.
- [4] 李海洋. 基于数字摄影测量理论的构筑物模型形变测量方法研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2018.
- [5] 张松雷. 近景摄影测量方法在桥梁线形监测上的应用[J]. 自动化与仪器仪表, 2016(12): 53-54, 57.
- [6] 胡兴意, 陈波, 刘国强, 等. 融合 BIM 与影像建模技术的桥梁检测方法及其应用研究[J]. 中外公路, 2020, 40(1): 107-112.
- [7] 颜鲁鹏, 吴逸飞, 陈波, 等. 融合 BIM 与现实捕捉技术的

# 斜拉桥施工控制中索长误差的修正方法研究

黄蓁,陈常松\*

(长沙理工大学 土木工程学院,湖南 长沙 410114)

**摘要:**为了使斜拉桥施工过程中斜拉索的索长误差得到有效修正,该文提出以斜拉索锚杯外露量为误差控制指标的修正方法,从施工控制的角度分析斜拉索的弹性模量、温度效应以及锚点坐标等因素对索长误差的影响,然后通过对制造索长和锚固端螺母位置的调整达到误差修正的目的。在嘉鱼长江公路大桥中的应用结果表明:这一方法提高了斜拉索张拉完成后的实际锚杯外露量与理论值的吻合度,使螺母能够位于锚杯的有效螺纹区域,确保了该桥主梁悬臂架设过程中斜拉索安装与张拉的高效实施。

**关键词:**斜拉桥;斜拉索;索长误差;锚杯外露量;误差修正

**中图分类号:**U448.27

**文献标志码:**A

## 0 引言

在斜拉桥的拉索施工中,斜拉索实际索长与理论索长之间不可避免地存在误差。当斜拉索张拉完

成且张拉端的锚杯套上螺母时,比较张拉端实际锚杯外露量(锚杯超出螺母的长度)与理论值便可得知具体的索长误差。张拉斜拉索时,若斜拉索偏长,则需要在原有垫板之上再加垫板才能锚固;若斜拉索偏短,锚杯外露量偏小,螺母最终只能位于锚杯尾部

- 高速公路病害检测信息化技术研究[J].中外公路,2020,40(2):300-306.
- [8] 高俊祥.基于图像处理和机器学习的桥梁检测新技术研究[D].南京:东南大学,2018.
- [9] 苏琦,刘佰鑫,王权权,等.基于多旋翼无人机的桥梁外观检测技术及工程应用研究[J].预应力技术,2017(5):7-11.
- [10] 陈榕峰,徐群丽,秦凯强.桥梁裂缝智能检测系统的新进展[J].公路,2019,64(5):101-105.
- [11] 李灏天,陈晓冬,徐怀远,等.基于Bilateral-Frangi滤波的桥梁裂缝检测算法[J].激光与光电子学进展,2019,56(18):170-176.
- [12] 周志祥,姜腾蛟,唐亮,等.移动式三维激光扫描系统在桥面全息变形监测的应用研究[J].应用基础与工程科学学报,2018,26(5):1078-1091.
- [13] 缪盾,吴竞.基于AgisoftPhotoscan的图像三维重建及精度研究[J].测绘工程,2017,26(8):41-44.
- [14] 董湘婉,袁向荣,任张晨,等.数字图像技术在三等跨连续梁振动分析中的运用[J].实验室研究与探索,2018,37(3):14-16.
- [15] SMEC South Africa.Provision of consulting services for the design and construction supervision of informal area metering within eThekweni municipality[J].Civil Engineering,2019,27(11):33.
- [16] 姚华,杜松.近景摄影测量技术应用于桥梁检测的试验研究[J].北方交通,2019(5):43-45,49.
- [17] 段浪.基于数码相机的桥梁缺陷尺寸测量技术研究[C]//中国土木工程学会2016年学术年会论文集,2016:347-356.
- [18] 魏文龙,刘森森.基于轻量化神经网络的桥梁裂缝识别检测[J].南方农机,2020,51(21):125-126.
- [19] 项小伟.近景摄影辅助倾斜摄影的影像匹配及三维建模研究[D].太原:太原理工大学,2019.
- [20] 李良福,冯建云,宋睿.基于图像重生成的桥梁裂缝检测方法研究[J].光电子·激光,2019,30(12):1298-1308.

收稿日期:2022-11-12

基金项目:国家自然科学基金资助项目(编号:51678070)

作者简介:黄蓁,男,博士研究生.E-mail:37679609@qq.com

\*通信作者:陈常松,男,博士,教授,博士生导师.E-mail:1343471153@qq.com