

改进的桥梁三维重构及裂缝检测系统^①



孙乐乐¹, 席一帆¹, 孙恒², 钟永元³

¹(长安大学 信息工程学院, 西安 710064)

²(长安大学 汽车学院, 西安 710064)

³(福建省高速技术咨询有限公司, 福州 350001)

通讯作者: 孙乐乐, E-mail: 1362321442@qq.com

摘要: 针对桥梁病害检测问题, 尤其是损害程度较高的裂缝检测, 结合已有的桥梁检测系统, 本文提出一种改进的桥梁检测系统, 改进后的系统硬件是大疆 M210-RTK 无人机, 软件由图像数据获取模块、裂缝检测模块、3D 模型构建模块构成。其中, 裂缝检测模块增加了裂缝长宽计算功能, 对裂缝分段迭代后进行曲线拟合求取长度, 骨架法计算宽度。在实验中设置无人机的飞行轨迹、扫描间距、拍摄距离以及对待检测桥梁桥墩分区编号, 最终拍摄了 200 张桥墩桥面图片和采集了桥梁视频数据。通过对桥墩桥面裂缝种类的识别和裂缝长宽计算, 更全面的了解了裂缝信息及危害程度, 减少了后期人工测量, 并结合 Ubuntu 16.04 系统, 使用直接稀疏里程计法 (DSO) 进行桥梁 3D 建模, 3D 模型能够方便直观的展示桥梁概况。改进后的系统稳定, 方法省时省力, 适用性广, 特别是对一些跨海大桥及周边环境复杂的桥梁检测具有重要意义。

关键词: 桥梁工程; 无人机; 裂缝检测; 图像处理; 3D 建模

引用格式: 孙乐乐, 席一帆, 孙恒, 钟永元. 改进的桥梁三维重构及裂缝检测系统. 计算机系统应用, 2020, 29(12): 64-71. <http://www.c-s-a.org.cn/1003-3254/7700.html>

Improved Bridge 3D Reconstruction and Crack Detection System

SUN Le-Le¹, XI Yi-Fan¹, SUN Heng², ZHONG Yong-Yuan³

¹(School of Information Engineering, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

²(School of Automobile, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

³(Fujian Provincial Expressway Technology Consulting Co. Ltd., Fuzhou 350001, China)

Abstract: Aiming at the problem of bridge disease detection, especially the crack detection with high degree of damage, combined with the previous bridge detection system, an improved bridge detection system was proposed in this study. The hardware of the improved system is the DJI M210-RTK Unmanned Aerial Vehicle (UAV), and the software consists of image data acquisition module, crack detection module, and a module of 3D model building. In this study, calculation function of crack length and width is added to the crack detection module, and the length of the crack is calculated by curve fitting after iteration, besides, skeleton method is used to calculate the width. In the experiment, by setting the flight path, scanning distance, shooting distance of the UAV and the sub-region number of the bridge pier to be tested in advance, 200 pictures of the bridge pier deck and the video data of the bridge were collected. By identifying the crack types of bridge deck, and calculating length and width of crack, it can make us having a more comprehensive understanding of crack information and the degree of damage, and manual measurement in later period can be reduced, besides, combined with Ubuntu 16.04 system, the 3D model can easily and intuitively display the general situation of the bridge with using Direct Sparse Odometry (DSO) to carry out bridge 3D modeling. The improved system is stable, the method saves time and effort, and has wide applicability, especially for the detection of some sea-crossing bridges and

① 基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (51878066)

Foundation item: General Program of National Natural Science Foundation of China (51878066)

收稿时间: 2020-04-25; 修改时间: 2020-05-21; 采用时间: 2020-06-01; csa 在线出版时间: 2020-11-30

bridges with complex surrounding environments.

Key words: bridge engineering; Unmanned Aerial Vehicle (UAV); crack detection; image processing; 3D modeling

1 引言

随着公路桥梁数量的不断增多,后期的检验养护等问题也越来越多.根据《公路养护技术规范》裂缝宽度最大容许值为 0.25 mm,对于裂缝大于 0.25 mm 的裂缝应当及时封闭处理.传统的裂缝检测主要是桥检车,高倍望远镜等,检测耗时耗力,对于跨海大桥及复杂环境桥梁,传统方法不能很好的满足需求,因此,提出一种高效适用性强的桥梁检测系统很有意义.

对于桥梁检测国内外学者做了大量研究, Baltazart^[1] 改进了最小路径算法并在 3 种平台检验裂缝测试效果. Dinh 等^[2] 从裂缝图像的阈值背景出发提取感兴趣区域,在均值滤波后进行裂缝检测. Hoshyar 等^[3] 提出一种混合方法检测,通过传感器接收到的数据进行处理,提取出裂缝的统计特征并结合支持向量机进行裂缝检测. Teng 等^[4] 提出了一种基于形状的裂缝检测方法,提取出潜在裂缝并进行曲线拟合,根据形状度量来区分裂缝及其背景. Prasanna 等^[5] 设计了一种空间解调分类器检测裂缝,该法精度高但是检测结果不具连贯性.

国内也发展迅速,杨会玲等^[6] 提出一种基于多尺度滤波和裂缝合并算法,突出裂缝特征检测裂缝.陈瑶等^[7] 用爬壁机器人采集数据,并通过 KD 树分类和支持向量机实现检测.瞿中等^[8] 研究了图像中细小裂缝的检测,提出一种加速渗流模型,快速检测裂缝.刘洪公等^[9] 提出了卷积神经网络检测裂缝,识别不同的裂缝图像,改进了网络模型.孙乐乐等^[10] 提出裂缝检测拼接 3D 系统,该系统检测方便,但未考虑到裂缝长宽的测量,本文在此基础上改进,增加裂缝长宽检测,可以对宽度超标的裂缝及时封闭处理.

无人机桥梁适用性强,数据采集方便,不受地理条件的制约.本文设计的改进型桥梁三维重构及检测系统,硬件是大疆 M210-RTK 工业级无人机,软件是由图像数据获取模块、裂缝检测模块、3D 模型构建模块构成,并提出改进后的检测方法,该检测方法是无人机分别采集图片视频数据,对采集回来的图片数据进行裂缝种类识别,长度计算.对视频数据建立 3D 模型,3D 模型能够直观看到裂缝在桥梁中的区域,便于检修人员

快速找到病害位置并及时制定解决方案.本方法提高了整个桥检的效率,通过长宽计算功能的添加,完善了桥检系统,减少了后期人工测量长宽,节省了一些人物力.

2 系统介绍

本系统由 3 个模块组成,图像数据获取模块,裂缝检测模块,3D 模型构建模块,如图 1.

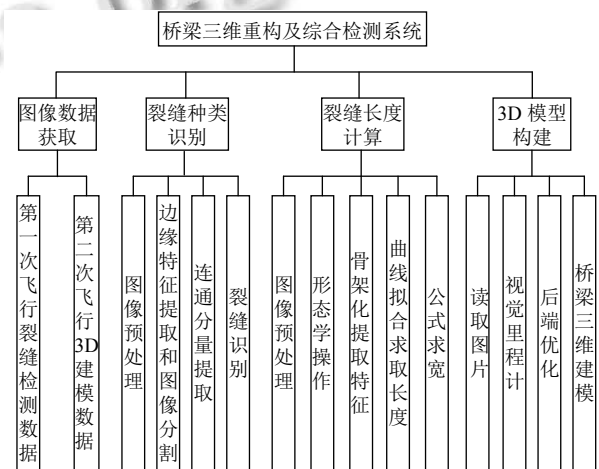


图 1 系统总体功能模块

该系统的图像数据获取模块和裂缝检测模块采用 Matlab 语言并在 Matlab R2015b 平台上设计了工作界面,3D 建模是基于 Ubuntu 16.04 系统.其中裂缝检测可与 3D 建模分开并独立工作,提升工作效率.图像获取模块根据桥梁的不同采集时间也不同,一般半天左右,每张裂缝图片种类检测耗时 3.6 s,长宽检测平均耗时 4.3 s.3D 建模耗时一般为所采集视频时长的 1.5 倍.软件系统界面如图 2.图 2(a)和图 2(b)是 Matlab 界面主要用于裂缝检测和图像拼接,图 2(c)和图 2(d)是 3D 建模界面.

2.1 无人机图像数据获取

本文采用大疆无人机 M210-RTK 采集图像,该型号无人机是大疆公司篇高端的一款机型,抗干扰能力强,障碍物感知准确,具体参数信息见表 1.

为了保证无人机安全作业,首先要预制飞行方案,其次将桥墩划分区域,具体划分规则是将桥墩柱从上到下每隔 1 m 作为一个区域,并对每个区域进行编号,

方便后期维护人员快速找到裂缝的大致位置。

第一次飞行将避障距离设为 2 m, 设置定时定距离环绕桥墩拍摄, 设置的定时时间是 2 S, 设定的固定距离是 2 m, 以划分好的区域为单位进行飞行拍摄。

第二次飞行时启用录像功能, 选择环绕飞行模式, 以桥墩为中心, 飞行一周进行采集数据, 拍摄时要设置好镜头转变的角度, 不能过大或过小, 本文将角速度设为 $\pi/9$ (rad/s)。



图2 软件系统工作界面

参数	值	参数	值
无人机类型	工业无人机	最大下降速度	垂直: 3 m/s
动力系统	电动	最大飞行海拔	2500 m
动力电机型号	DJI 3515	最大水平飞行速度S/A模式:	23 m/s
螺旋桨型号	1760S	工作频率	5.725-5.850 Hz
轴距	643 mm	遥控距离	7 km/s (FCC)
最大起飞重量	1.87 kg	最大可承受风速	10 m/s
最大上升速度	P/A/S模式: 5 m/s	工作环境温度	-20~45 °C
障碍物感知范围	0.7~30 m	最大飞行时间	27 min

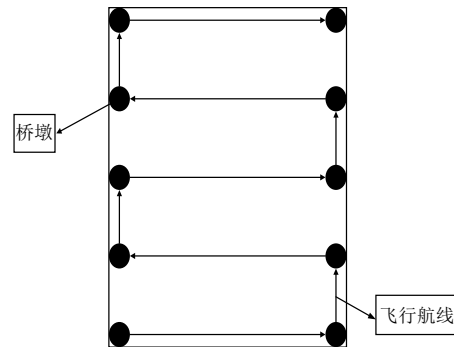


图4 飞行模式图

图3 为无人机实物图, 图4 为无人机飞行模式图。

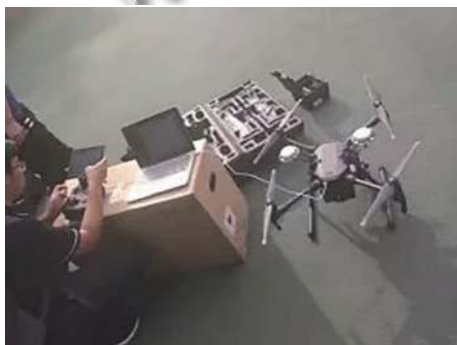


图3 无人机及作业画面

2.2 裂缝检测

裂缝是危害桥梁安全的重要因素, 及时准确的检测对后期保养维修起着重要的作用, 本文主要研究水泥沥青路面的裂缝种类及长宽计算, 检测步骤分为 6 步。

(1) 灰度化. 为了减小内存提高处理速度, 将原图灰度化, 本文灰度化采用 RGB 加权平均法来, 见式 (1):

$$I(i, j) = 0.3 \times R(i, j) + 0.59 \times G(i, j) + 0.11 \times B(i, j) \quad (1)$$

(2) 中值滤波. 中值滤波是一种非线性平滑技术, 在滤波的同时可以保护边缘信息^[11], 见式 (2):

$$g(x) = medf\{f(x-k, y-l), (k, l \in w)\} \quad (2)$$

式中, $f(x)$ 是原图, $g(x)$ 是滤波后的图, w 是在原图上滑动的模版, 本文模版取 3×3 , 如下:

$$w = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

(3) 图像边缘与周围像素差值较大, 包含着丰富的细节信息. 由于 Sobel 算子运行速度快, 处理噪声较多和灰度渐变的图像效果好^[12], 此处采用 Sobel 算子进行边缘检测, Sobel 算子有 x 和 y 两个方向构成, 并分别求卷积求取梯度, 模版如下:

水平方向模版:

$$G_x = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} * A \quad (3)$$

垂直方向模版:

$$G_y = \begin{bmatrix} -1 & -2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 2 & 1 \end{bmatrix} * A \quad (4)$$

每个点梯度的大小:

$$G = \sqrt{G_x^2 + G_y^2} \quad (5)$$

(4) 裂缝边缘连通分量提取. 若 u 是 y 中的一个点, y 是 A 中一个连通分量, 每次迭代仅能得到一个连通分量, 因此需不断迭代直至求出所有连通分量, 即式 (6):

$$\begin{cases} X_k = (X_{k-1} \oplus B)A \\ X_K = X_{K-1} \end{cases} \quad (6)$$

式中, $X_0 = u, k=1, 2, 3, \dots, A$ 为天津法分割后的图像, \oplus 为膨胀运算, B 为膨胀的结构元素, 本文结构元素是 8 连通区域的 3×3 矩阵, 结构元素见图 5.

1	1	1
1	1	1
1	1	1

图 5 结构元素 (均为 1)

(5) 裂缝种类识别. 桥梁中的裂缝主要分为 3 类: 横向, 竖向, 网状. 本文通过像素累计迭代法判定裂缝类型, 首先计算裂缝的质心坐标 (x_{cen}, y_{cen}) , 然后以长 $8r+1$, 宽 $2r+1$ 并以质心坐标 (x_{cen}, y_{cen}) 构建矩形, 计算矩形内裂缝像素和 $sumr$ 与总像素的比值 ρ , 若 ρ 小于 0.8, 则 $r+10$ 扩张矩形再次进行计算, 直至 $\rho > 0.8$, 计算过程如图 6.

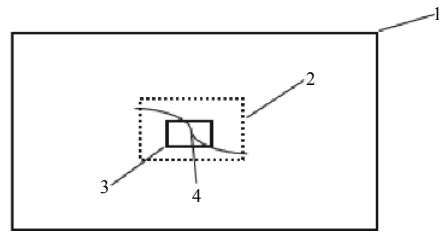


图 6 计算裂缝像素数目

图 6 中 4 表示裂缝, 3 表示初始建立的长为 $8r+1$, 宽为 $2r+1$ 的长方形 (初始值 $r=10$), 2 表示扩张后的长方形 (每次以 $r=r+10$ 进行扩张), 1 表示拍摄的整个图片. 裂缝的分布密度 ρ 为:

$$\rho = \frac{sumr}{(2r+1)(8r+1)} \quad (7)$$

计算 x_{max}, y_{max} 差分值并与 0.2 作比较, 在 ρ 小于 0.2 的情况下, $x_{max} < y_{max}$ 为纵向裂缝, $x_{max} > y_{max}$ 为横向裂缝, 若 ρ 的值在 0.2 与 0.335 之间则为网状裂缝.

(6) 裂缝的尺寸计算. 裂缝的长度宽度可以直观的反应对桥梁的危害程度, 对于小于规定的裂缝宽度可以忽略, 大于规定阈值 0.25 mm 要及时封闭处理.

将第 (4) 步边缘连通分量提取之后的图像进行闭操作, 闭操作是先膨胀后腐蚀, 可以平滑轮廓, 并填充比结构元素小的洞^[13], 见式 (8):

$$G \cdot R = (G \oplus R) \ominus R \quad (8)$$

式中, R 表结构元素, 本文用的是 3×3 的单位矩阵, \oplus 为膨胀操作符, \ominus 为腐蚀操作符, G 为闭操作处理之后的图像.

类比定积分思想, 对上述图像通过分段迭代法进行曲线拟合求取长度, 步骤如下, 示意图见图 7.

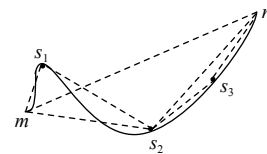


图 7 分段迭代示意图

- ① 连接裂缝左右端点 mn , 在曲线上找一点 s_2 , 使 s_2 到线段 mn 的距离最大.
 - ② 连接 m 和 s_2, n 和 s_2 , 分别在其中间找 s_1 和 s_3 满足 s_2 到线段 ms_2, ns_2 的距离最大.
 - ③ 重复上述步骤, 直至满足最大距离小于设置的阈值.
 - ④ 将 $ms_1, s_1s_2, \dots, s_{(n-1)}n$ 相加得到裂缝的长度像素 l .
- 骨架化在图像处理中主要用于骨架的提取, 将一定宽度的裂缝变成单像素宽, 骨架化可以简洁的描述

裂缝的形态信息, 目标 M 中所有最大内切圆的圆心构成了目标 M 的骨架 $SK(M)$ ^[14], 骨架化示意图见图 8.

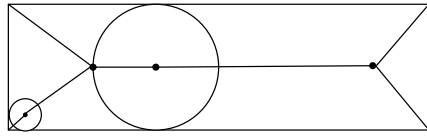


图 8 骨架法示意图

骨架的每一个点都有对应的半径和最大内切圆, 见式 (9):

$$SK(M) = \bigcup_{r>0} s_r(M) = \bigcup_{r>0} [(M \ominus B) - (M \ominus rB)]_{drB} \quad (9)$$

式中, M 为待处理目标, rB 代表半径为 r 的圆, drB 代表微小半径的圆, 骨架化之前像素数是面积 S , 已知 l , 则骨架化后的裂缝宽度 d 见式 (10):

$$d = \frac{S}{l} \quad (10)$$

2.3 3D 模型构建

本文三维构建采用直接稀疏里程计法 DSO (Direct Sparse Odometry). 基于收集到的图像信息, DSO 可以在陌生环境下通过连续的数据流对数据进行建模. DSO 视觉里程计通过计算局部地图中的点得到像素点的三维坐标, 并记录视觉里程计不同时刻的相机位姿, 根据基于图优化估计得到的全局轨迹, 建立符合建模的环境或地图^[10].

DSO 是一种视觉 Slam 的解决方案, 但与传统 Slam 匹配特征点不同^[15], 它是直接视觉 Slam 法与稀疏法相结合, 利用图像中的所有像素点, 将不同时刻的位姿估计与数据关联联系起来, 统一成优化问题, 这对图像细节信息少, 纹理特征弱的桥梁图像具有较高的鲁棒性.

本文通过 DSO 对桥梁进行三维建模, 可建出桥梁概况, 在检测到有裂缝的区域之后, 可通过对 3D 模型做出标记, 方便检修人员在检修作业前了解其大概方位, 可以更快地到达目的地. 3D 建模的步骤如下所示:

(1) 标定图片, 计算内参矩阵. 为了减小透镜畸变的影响, 在用无人机采集图像之前要对相机进行标定, 为了提高标定精度, 每副标定图片都有一定的角度变化, 本文标定图片采用 8×8 的棋盘格, 角点数为 49, 每个格子边长 2.5 mm, 标定图片见图 9.

将 15 副标定图片输入 Matlab 中 Camera Calibrator 工具箱, 得出内参矩阵 K :

$$K = \begin{bmatrix} 2327.8 & 0 & 2018.8 \\ 0 & 2331.7 & 1511.1 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$



图 9 标定图片

(2) 视觉里程计 (VO)

视觉里程计 VO (Visual Odometry) 是 3D 建模中一个重要的环节, 它通过对视频中连续变化图像的提取, 计算出不成熟且逆深度收敛的三维坐标点, 从而得到点云数据. 在建模过程中, 后端优化与视觉里程计同时存在. 假设两帧图像 I_1, I_2 和空间中的点 P 是同一个相机获取的, P_1, P_2 代表空间点 P 在 I_1, I_2 中的像素坐标, $[X, Y, Z]$ 是其世界坐标, 如图 10.

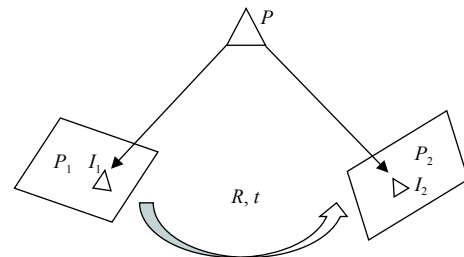


图 10 直接法示意图

为了得到相机位姿变换, 参考第一帧并求取第二帧的移矩阵 t 和旋转矩阵 R , 考虑到在整个建模过程中相机内参矩阵 K 保持不变, P_1 和 P_2 的投影方程为:

$$P_1 = \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \frac{1}{z_1} KP \quad (11)$$

$$P_2 = \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \frac{1}{z_2} K(RP + t) = \frac{1}{z_2} K(\exp(\xi^\wedge)P) \quad (12)$$

其中, z_1 是空间点 P 在第一帧图片 I_1 的深度, z_2 空间点 P 在第二帧 I_2 的深度, K 为无人机相机的内参矩阵, ξ 为 t, R 对应的代数.

在 VO 中对每一帧图像的流程如图 11 所示.

(3) 后端优化

DSO 中滑动窗口关键帧与其相连的成熟点 (地图点) 构成了残差项, 建立了后端优化问题, 为了后端优化, 本文采用高斯-牛顿法进行迭代, 迭代过程中残差项会形成一个大的线性方程^[16]:

$$J^T W J \sigma x = -J^T W r \quad (13)$$

其中, r, W, J 为残差权重和雅可比行列式, δx 是全局优化更新量. 在 3D 建模的过程中不断重构这个优化问题, 并保存优化后的结果.

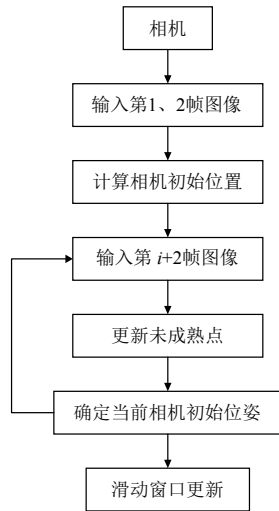


图 11 DSO 每帧图像处理流程

3 实验结果

3.1 裂缝检测实验

在西安市桥墩桥面出拍摄了 200 副裂缝图片, 100 副水泥裂缝, 100 副沥青裂缝, 依托 2.2 节所述理论方法, 基于 Matlab 平台进行了识别, 正确识别率高达 93.3%, 精度较高, 对于病害能够及时检测到. 水泥, 沥青裂缝识别精度见表 2 和表 3, 长宽计算精度见表 4, 部分检测结果见图 12.

表 2 水泥裂缝识别精度

样本	总数量	正确识别数量	识别精度(%)
横向裂缝	30	28	93.3
纵向裂缝	27	30	90
网状裂缝	40	35	87.5

表 3 沥青裂缝识别精度

样本	总数量	正确识别数量	识别精度(%)
横向裂缝	35	31	88
纵向裂缝	40	35	87.5
网状裂缝	25	19	76

表 4 裂缝长款计算精度

裂缝样本	实测宽度(mm)	计算宽度(mm)	相对误差
图12(b)部分放大区域1	0.285	0.302	5.63
图12(b)部分放大区域2	0.264	0.249	5.57
图12(c)图	0.300	0.291	3.33
100张裂缝平均误差		4.35%	

3.2 建模实验

本次实验地点为长安大学的桥梁柱, 该桥梁柱与桥墩具有相同的特征, 因此选用此柱模拟桥梁桥墩以检验建模效果, 通过大疆 M210-RTK 采集视频, 结合上述 DSO 法, 在 Ubuntu 16.04 系统中完成了程序设计进行 3D 建模. 效果图如图 13 和图 14.

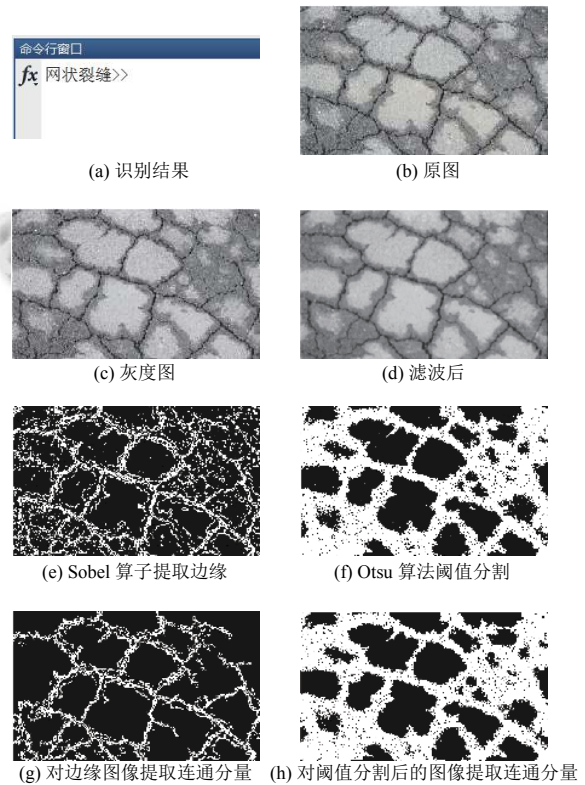


图 12 检测结果

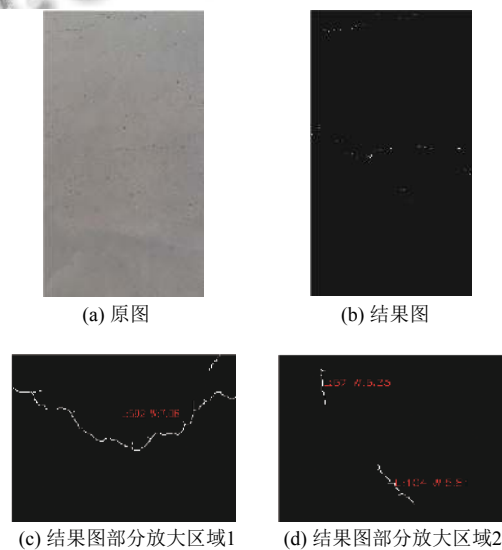


图 13 效果图左下角大图

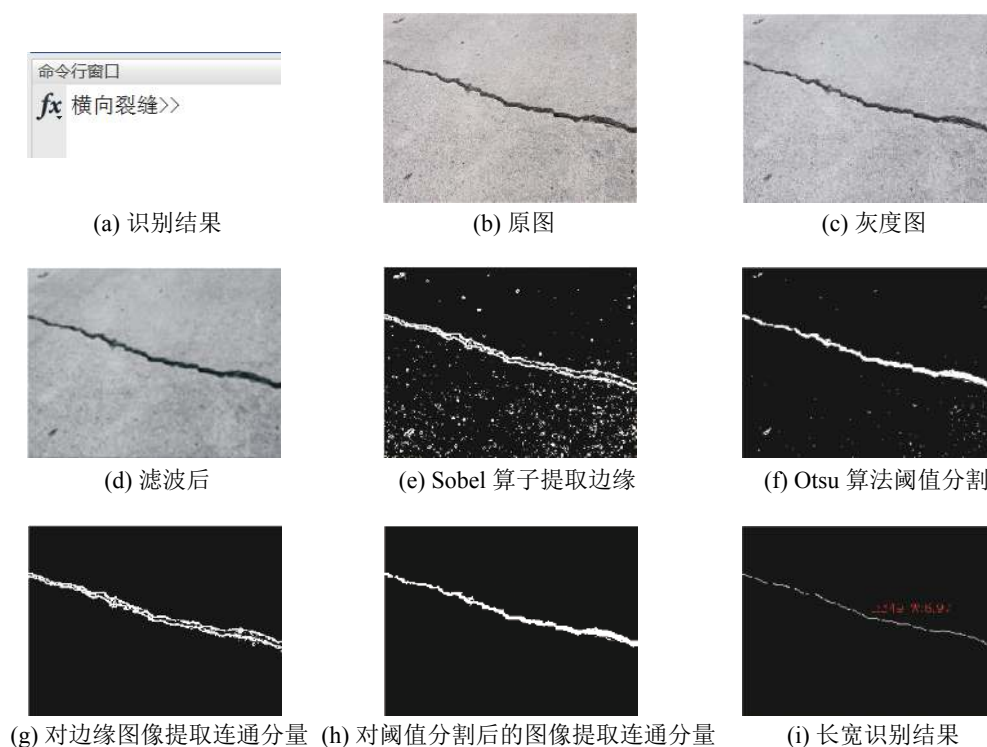


图 14 效果图

4 结语

本文针对桥梁裂缝病害检测,提出了基于无人机的桥梁三维重构及检测系统,针对此系统提出了相应的检测方法:

(1) 获取图像数据,本文基于无人机采集,方便灵活且安全高效。

(2) 裂缝检测,对无人机采集回来的图片进行种类的识别和长宽的计算,更为全面的了解裂缝信息,对超标的裂缝及时封闭处理。

(3) 本文用 DSO 法进行三维立体式模型构建,对桥梁全貌可以有直观的了解,对检测出来的裂缝按照之前划分好的对应标号可在 3D 模型中直观了解到病害的具体方位,对维修人员工作前的方案制定有一定帮助。

(4) 本文在进行桥梁裂缝病害检测时采用工业级无人机获取数据,并将二维与三维相结合,可实现对裂缝检测并确定其大概方位。对复杂桥梁的裂缝病害检测具有高效,直观,易实现的现实意义。

参考文献

1 Baltazart V, Nicolle P, Yang L. Ongoing tests and improvements of the MPS algorithm for the automatic crack

detection within grey level pavement images. 2017 25th European Signal Processing Conference. Kos, Greek. 2017. 2016–2020.

2 Dinh TH, Ha QP, La HM. Computer vision-based method for concrete crack detection. 2016 14th International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision. Phuket, Thailand. 2016. 1–6.

3 Hoshyar AN, Kharkovsky S, Samali B. Statistical features and traditional SA-SVM classification algorithm for crack detection. Journal of Signal and Information Processing, 2018, 9(2): 111–121. [doi: 10.4236/jsip.2018.92007]

4 Wang T, Gopalakrishnan K, Smadi O, *et al.* Automated shape-based pavement crack detection approach. Transport, 2018, 33(3): 598–608. [doi: 10.3846/transport.2018.1559]

5 Prasanna P, Dana KJ, Gucunski N, *et al.* Automated crack detection on concrete bridges. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2016, 13(2): 591–599. [doi: 10.1109/TASE.2014.2354314]

6 杨会玲, 崔洪恩, 孙慧婷, 等. 多尺度矩阵滤波的路面裂缝检测方法研究. 液晶与显示, 2016, 31(8): 778–783.

7 陈瑶, 梅涛, 王晓杰, 等. 基于爬壁机器人的桥梁裂缝图像检测与分类方法. 中国科学技术大学学报, 2016, 46(9): 788–796.

8 瞿中, 郭阳, 鞠芳蓉. 一种基于改进渗流模型的混凝土表面

- 裂缝快速检测算法. 计算机科学, 2017, 44(1): 300–302, 313. [doi: 10.11896/j.issn.1002-137X.2017.01.055]
- 9 刘洪公, 王学军, 李冰莹, 等. 基于卷积神经网络的桥梁裂缝检测与识别. 河北科技大学学报, 2016, 37(5): 485–490. [doi: 10.7535/hbkd.2016yx05009]
- 10 孙乐乐, 孙恒, 徐婷. 基于无人机的桥梁三维重构及检测系统. 第十四届中国智能交通年会论文集. 青岛. 2019.13.
- 11 姜吉荣. 基于图像分析的路面裂缝检测方法研究 [硕士学位论文]. 南京: 南京邮电大学, 2016.
- 12 占继刚. 基于图像处理的桥梁底面裂缝检测识别方法研究 [硕士学位论文]. 北京: 北京交通大学, 2017.
- 13 郭亚, 肖定华, 黄艳国. 数学形态学和多尺度分析的路面裂缝提取. 公路, 2018, 63(1): 31–34.
- 14 黄卫岭. 基于图像处理技术的桥梁裂缝测量系统研究 [硕士学位论文]. 北京: 北京交通大学, 2013.
- 15 Davison AJ, Reid ID, Molton ND, *et al.* MonoSLAM: Real-time single camera SLAM. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2007, 29(6): 1052–1067. [doi: 10.1109/TPAMI.2007.1049]
- 16 Engel J, Koltun V, Cremers D. Direct sparse odometry. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2018, 40(3): 611–625. [doi: 10.1109/TPAMI.2017.2658577]

欢迎关注“中国计算机期刊网”+“智刊IT”

“中国计算机期刊网”是中国科学院软件研究所主办,《软件学报》编辑部承办,计算机领域科技期刊群集公益平台。旨在集合中国计算机类学术期刊资源,在这里您可以阅读优秀科技论文,获取最新会议期刊征文信息,知晓期刊官方消息,紧跟研究发展热点。平台通过各种形式展示、提高各期刊文章显示度,同时为计算机学术交流做贡献,为计算机领域研究人员服务。

为方便广大科研人员通过移动设备浏览信息,设置唯一微信公众号“智刊IT”。定期发布计算机、软件、信息科学研究领域最新消息,致力于整合领域期刊资源,最新优秀论文导读,热点资讯新闻共享,服务IT科研人员。

欢迎您访问“中国计算机期刊网”,关注“智刊IT”微信!

网 址: www.computerjournals.net

电子邮箱: cj_mail@iscas.ac.cn

服务微信: 中国计算机期刊网 (ComputerJournals)

微 信: 智刊IT (zhikan-it)

