

基于飞行时间相机的轨道三维成像方法研究

陈晶晶, 田 鹏, 黄 伟

(四川大学 机械工程学院, 四川 成都 610065)

摘 要: 高速铁路的快速发展对轨道的实时性检测要求越来越高。为满足轨道检测的速度和三维成像需求, 提出一种基于飞行时间相机的轨道检测方法。飞行时间相机通过计算光在空气中的往返时间来获取目标的强度信息和深度信息; 通过改变相机的成像深度范围从轨道点云数据中粗提取出轨道信息, 利用相机输出的二维图像和深度数据实现对轨道信息的精提取, 快速获得轨道的三维数据; 搭建实验平台, 利用相机拍摄不同成像深度的轨道图像, 经处理后得到轨道的几何尺寸和体积。

关键词: 轨道; 三维成像; 飞行时间相机

中图分类号: TP27

文献标识码: A

DOI: 10.16157/j.issn.0258-7998.212435

中文引用格式: 陈晶晶, 田鹏, 黄伟. 基于飞行时间相机的轨道三维成像方法研究[J]. 电子技术应用, 2022, 48(10): 78-82.

英文引用格式: Chen Jingjing, Tian Peng, Huang Wei. Research on a fast 3D imaging of rail based on Time-of-Flight camera[J]. Application of Electronic Technique, 2022, 48(10): 78-82.

Research on a fast 3D imaging of rail based on Time-of-Flight camera

Chen Jingjing, Tian Peng, Huang Wei

(School of Mechanical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: The real-time measurement of rail is more important with the rapid development of high-speed railway. A fast 3D imaging based on the Time-of-Flight camera is proposed to meet the speed and 3D imaging requirements of rail detection. Refer to calculate the round-trip time of light in the air, Time-of-Flight camera obtains the intensity and depth information of object. The rough rail data is extracted from the rail point-clouds by changing the imaging depth of the camera, and the precise data is obtained by combining the 2D images with the depth data. Then the 3D data of rail is quickly obtained. An experimental platform was set up to take the rail images with different imaging depths, and the physical dimensions and volume of rail were figured out.

Key words: rail; 3D imaging; Time-of-Flight camera

0 引言

截至 2020 年, 全国铁路运营里程共计 15 万千米, 其中高速铁路占运营总里程的 1/5。随着铁路规模的不断扩大, 轨道检测成为铁路运行安全问题的重中之重^[1]。根据《高速铁路无砟轨道线路维修规则(试行)》^[2], 轨道检测参数包括轨道静态几何尺寸容许偏差值和轨道动态不平顺项目, 如轨距、高低、水平、扭曲和轨距变化率等。现有轨道检测手段主要分为两种: 一是传统人工巡检, 检测效率低下, 检测项目单一, 费时费力, 对工人熟练程度要求高, 检测结果受各种主观因素影响^[3]; 二是轨道检测车, 对比人工检测, 轨道检测车提高了检测精度、检测效率和检测项目, 但其检测速度也还不能满足实时性的要求。目前轨道检测车主流的检测技术包括超声波检测技术、涡流探伤技术和基于图像处理和模式识别方法的视觉检测^[4]。基于图像处理和模式识别方法的视觉检测是检测轨道表面擦伤的最有潜力的技术之一,

具有非接触测量、适用于近景目标和视场较大的场景、适用于静态目标和动态目标、能快速获取被测目标的几何信息和信息量大等优点^[5-9]。

传统的三维成像方法利用多张二维图像计算出物体的三维信息, 算法较为复杂, 且对计算机性能要求较高。传统的激光雷达三维成像需要扫描, 成像速度慢, 分辨率不高^[10]; 随着光电接收器件(CCD)和计算机计数的发展, 激光雷达三维成像速度得以提高。飞行时间(Time-of-Flight, TOF)技术是一种基于光速不变原理, 通过测量光的传播时间来测量与目标之间的距离的方法^[11]。利用时间距离关系获得的三维点云数据可以对物体形状进行重建^[12-15]。随着 CMOS 和光源调制技术的发展, TOF 相机得到迅速发展, 在机器视觉、工业检测、自动驾驶、三维成像、非视域成像、超分辨成像领域得到应用^[16]。TOF 相机的测量原理决定其获取目标图像及深度数据快的特点, 从而快速定位物体, 得到物体的三维形

貌。本文基于 TOF 相机的测量原理,限制其成像深度范围,从轨道环境点云数据中粗提取出轨道上下平面空间内的点云数据;结合 TOF 相机输出的二维图像和深度数据,对轨道数据实现精提取,实现对轨道的三维成像,计算轨道的体积。

1 TOF 相机测距原理

TOF 相机采用主动光探测环境,由照射单元、光学镜头、TOF 传感器、控制单元和计算单元组成。图 1 为 TOF 相机工作原理示意图。工作原理是:控制单元控制照射单元发射调制光照亮被测目标,调制光经被测目标反射后由光学镜头会聚,被 TOF 传感器采集,由计算单元给出深度数据。光速是恒定的,TOF 相机根据光线返回相机的时间来计算到物体每个点的距离。TOF 相机原理与 3D 激光传感器基本类似,3D 激光传感器是逐点扫描,而 TOF 相机则是一次曝光得到整幅图像的深度信息和强度信息。

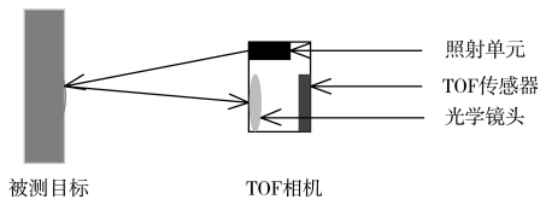


图 1 TOF 相机工作原理示意图

根据 TOF 相机的工作原理,数据采集流程如图 2 所示。照明单元发射非相干的调幅光 $r(x,y,t)$ 来探测场景,调幅光在空间传播并且被物体反射后得到反射信号 $p(x,y,t)$,反射信号经会聚透镜聚焦后被 TOF 传感器的光敏面接收,根据 TOF 传感器的传递函数 G 可得被测信号 $m(t)$,被测信号经过采样保持电路和数模转换后被记录为数字信号 $M(q)$ 。

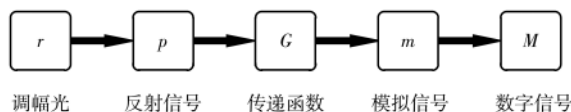


图 2 数据采集流程图

通过幅度调制波的相移确定距离。为了确定测量一定工作距离的适宜工作频率,使用公式 $c=\lambda f$,其中, c 是光速($c=3\times 10^8$ m/s), λ 是波长(λ 为工作距离,即所需要测量的长度范围), f 是频率。当强光的输出频率为 f 的正弦调制信号时,测量过程开始,光波到达测量物体被反射回来,除非物体和 TOF 传感器的距离正好是 λ 的整数倍,否则相位会略微偏移,能精确地测量相位差,即准确地测量反射物体与传感器之间的距离。在 4 个等距点(例如 90° 的间隔)测量接收信号的幅度分别为 A_1 、 A_2 、 A_3 、 A_4 ,则相位差 φ 为:

$$\varphi = \arctan\left(\frac{A_1 - A_3}{A_2 - A_4}\right) \quad (1)$$

相机到目标的距离 d 为:

$$d = \frac{c\varphi}{4\pi f} \quad (2)$$

2 数据处理

2.1 降噪处理

由于高铁轨道所处环境复杂多变,虽然 TOF 相机能够主动照明,适应一些特殊环境,但基于其测量原理,TOF 传感器接收的光除了有目标轨道的反射光以外,还有很多的环境分量,物体深度信息又只存在于反射光分量中,环境分量较高会降低 TOF 相机的信噪比。而且 TOF 相机分辨率较低,获取的三维云数据会产生大量的噪点,故在进行数据提取之前先对轨道环境三维点云数据进行降噪处理。

对于 240×320 分辨率的 TOF 相机,拍摄一次场景得到的数据是 76800×3 ,得到的深度图是一张灰度图,也是一张三维图。取出一维数据 76800,将其恢复为 240×320 矩阵形式,水平垂直坐标对应像素位置,该位置的灰度值对应的是该物体点与摄像头的距离。因此,深度图中的每个像素可以表示空间中的一个点的三维坐标。对于恢复后的 240×320 像素矩阵,采用平面滤波的形式来降低噪声的影响。采用 3×3 滤波算子对 240×320 矩阵进行滤波,如图 3 所示, k_i 表示恢复后矩阵的像素值。

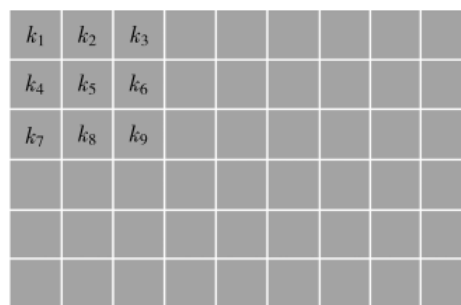


图 3 3×3 滤波算子

计算中心像素 k_5 与周围像素的深度差 A :

$$A = \sum_{i=1}^9 k_5 - k_i \quad (3)$$

计算中心像素 k_5 与围绕其为中心的左上方、左下方、右上方和右下方 4 个位置的 3 个相邻像素的深度差之和 D_1 、 D_2 、 D_3 、 D_4 ,取其中的最小值记为 B :

$$B = \min(D_1, D_2, D_3, D_4) \quad (4)$$

$$\begin{cases} D_1 = |k_5 - k_1| + |k_5 - k_2| + |k_5 - k_4| \\ D_2 = |k_5 - k_2| + |k_5 - k_3| + |k_5 - k_6| \\ D_3 = |k_5 - k_4| + |k_5 - k_7| + |k_5 - k_8| \\ D_4 = |k_5 - k_6| + |k_5 - k_8| + |k_5 - k_9| \end{cases} \quad (5)$$

给定噪声判断阈值 Q_1 和 Q_2 ,当 $Q_1 > A$ 且 $Q_2 > B$ 时,表示该像素值代表的深度数据与周围深度相差较大,说明该深度数据为噪声,应该舍去;反之,当 $Q_1 < A$ 且 $Q_2 < B$ 时,保留该深度数据。其中, Q_2 一般为 Q_1 的一半。

2.2 提取轨道点云数据

轨道点云数据的提取流程图如图4所示。

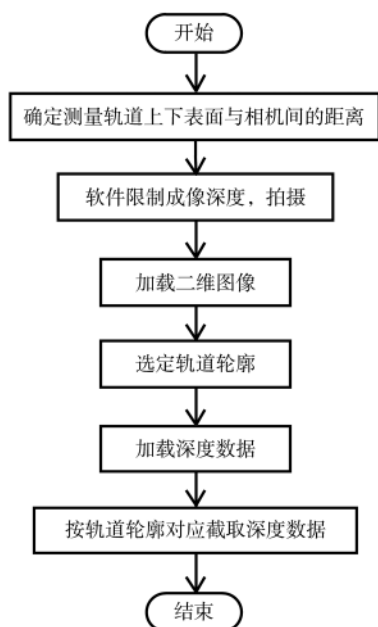


图4 轨道点云数据提取流程图

根据 TOF 相机的测量原理,搭建拍摄平台,曝光一次可以获取轨道所在环境与 TOF 传感器的距离;反之,根据轨道的上下表面与相机之间的距离,通过软件的方法限制 TOF 相机的最大成像深度和最小成像深度,可以实现从轨道环境的点云数据中粗略提取出轨道上下平面空间内的点云数据。将粗提取得到的轨道数据(即包含二维图像和深度数据)利用二维图像确定轨道轮廓,按照轮廓对相应的深度数据进行空间截取,进一步得到更加准确的轨道点云数据,减少环境噪声对轨道点云数据的影响,提高信噪比。

3 实验

实验中采用的是繁维科技公司型号为 TSP-V4、分辨率为 240×320 的 TOF 相机,测量精度为 $5 \text{ mm}@1 \text{ m}$ ($0.5\% \sim 1\%$),输出帧率为 30 f/s ,检测距离为 $0.3 \sim 10 \text{ m}$,体积小,功耗低,并且可抑制环境光的影响。TOF 相机的输出包括“.txt”和“.png”格式,其中,“.txt”文件存储的是深度数据,“.png”文件存储的是二维图像。实验室搭建的 TOF 相机拍摄平台如图5所示。

3.1 轨道环境点云数据的获取

根据实验室搭建的 TOF 相机拍摄平台,限制相机的最大成像深度为 50 cm ,最小成像深度为 26 cm ,分别得到轨道所在的滤波前和滤波后的二维图像和点云数据如图6所示。

从图6(b)中可以看出,背景数据很明显,其显示的灰度与轨道的灰度明显不一致,能使用肉眼直接分辨出轨道大致轮廓。另外,从图6(c)中可以清晰地分辨出轨道轮

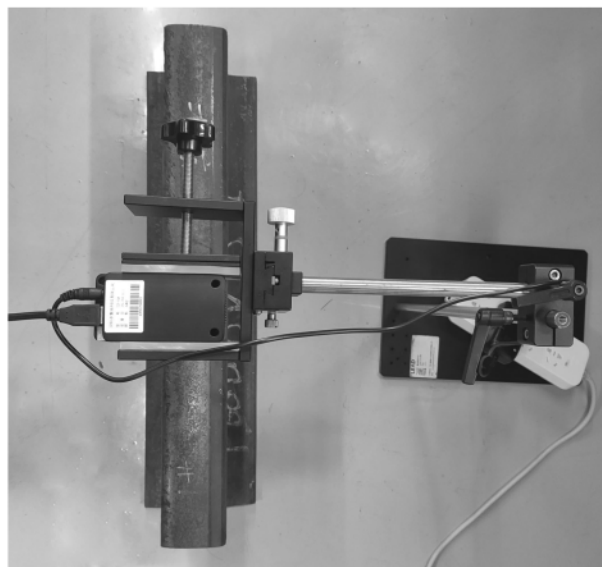


图5 实验平台

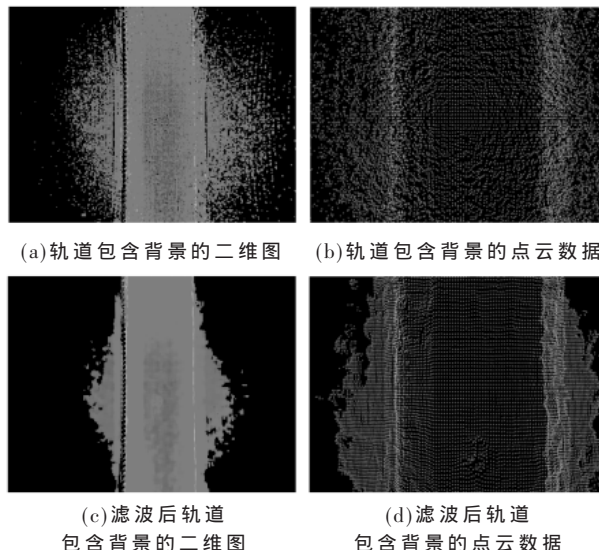


图6 TOF 相机成像深度范围 $26 \text{ cm} \sim 50 \text{ cm}$ 获得的轨道包含背景数据

廓,计算得出 TOF 相机拍摄到的轨道上表面尺寸为 $20 \text{ cm} \times 7.1 \text{ cm}$,下表面尺寸为 $20 \text{ cm} \times 14.5 \text{ cm}$,高度尺寸为 19.1 cm 。

3.2 轨道点云数据的获取

限制相机的最大成像深度为 40 cm ,最小成像深度为 26 cm ,分别得到轨道的滤波前和滤波后的二维图像和深度点云数据如图7所示。从图7(b)中可以看出,对比图6(b)而言,所获得轨道的点云数据中杂乱的背景数据大幅度减少,并且可以根据灰度值明显分辨出轨道的上表面和下表面深度数据,轨道轮廓能够清晰看到。

3.3 轨道表面点云数据的获取

限制最大成像深度为 30 cm ,最小成像深度为 25 cm ,得到轨道表面的滤波前后数据如图8所示。

从图8(b)中可以看出,因为限制相机的成像深度,

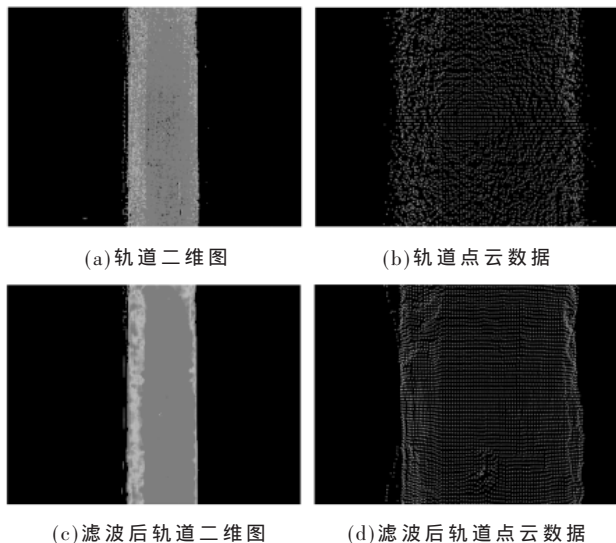


图7 TOF相机成像深度范围26 cm~40 cm获得的轨道数据

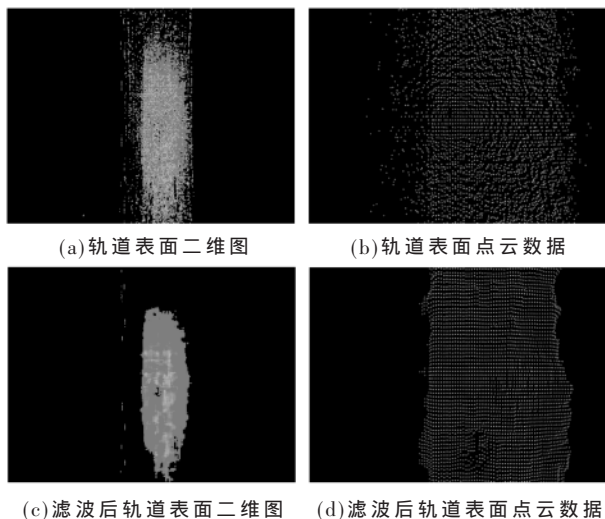


图8 TOF相机成像深度范围25 cm~30 cm获得的轨道表面数据

所以只获取轨道表面的点云数据,与图7(b)比较而言灰度级更高的轨道下表面数据基本除去。从图8(c)中可以看出,TOF相机拍摄轨道表面时,获得的二维图不是完整的,有部分残缺,分析原因。首先,TOF相机本身的成像视角有限制,只能得到部分的点云数据;其次,轨道表面因为腐蚀等原因,不能完全反射所有的测量光到TOF相机,导致图像上会出现黑孔,即反射光线没有进入传感器的位置,很大程度上轨道表面的反光程度影响了TOF相机的工作性能,反之,可以根据点云数据的分布来判断轨道表面缺陷;最后,实验所使用的TOF相机精度较低,拍摄轨道时会产生大量噪点,进而对结果产生影响。

3.4 计算体积

计算轨道的体积时,将获取的轨道点云数据读入MATLAB软件,利用alphaShape函数从离散的轨道三维

空间点云数据中提取边缘并建立对应的包络,最后利用volum函数计算轨道包络的体积。根据点云数据得到包络图如图9和图10所示,从图9可以看出由于背景数据的存在,形成的轨道包络不规则且与真实轨道尺寸不一致。而从图10中可以看出,经过轨道点云数据处理之后得到的包络图与真实轨道形状更接近。

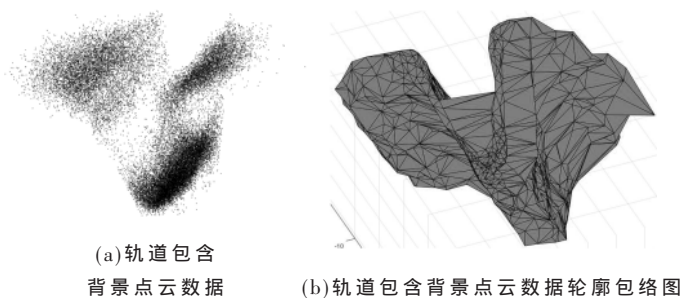
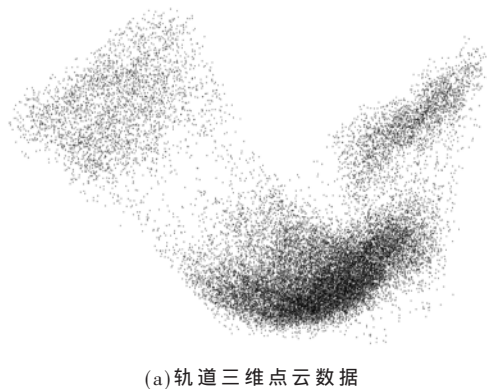
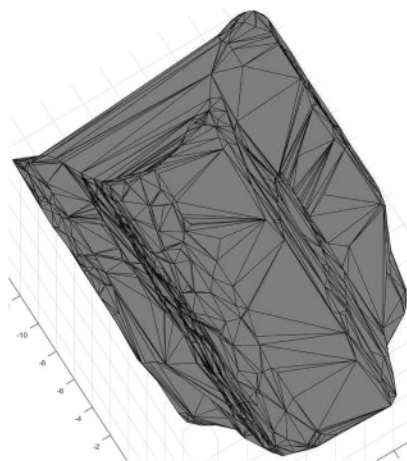


图9 轨道背景三维数据及包络图



(a) 轨道三维点云数据



(b) 轨道点云数据轮廓包络图

图10 轨道三维数据及包络图

从表1计算结果可以看出,误差小于5%,属于可接受范围,进一步分析误差原因。由于经济原因,实验使用的TOF相机测量精度为5 mm@(1 m),而轨道下表面的厚度约为5 mm,在限制相机成像深度时不能很好将背景和轨道下表面分离;另外,TOF相机拍摄的只是轨道上下

表 1 轨道体积计算

轨道梯形截面积 S/cm^2	轨道长度 L/cm	梯形截面轨道体积 V'/cm^3	本文算法计算体积 V/cm^3	误差 $\Delta/\%$
196.24	20	3 924.8	4 001.378	1.9

表面信息，没有侧面信息来辅助完成轨道横截面的获取，导致不能获得完整的轨道三维模型。最后，由于 TOF 相机存在视场角，拍摄得到的点云数据是发散的，形成的轨道包络横截面与标准横截面有出入。

4 结论

TOF 相机利用光在空气中飞行的往返时间来计算与目标之间的距离，测量原理决定其获取深度数据速度快的特点，即动态响应好。相对于高速列车的运行速度而言，TOF 相机能够在列车行驶的过程中对轨道或其他目标成像，并且能够一次性获得轨道的二维图像和深度信息。利用 TOF 相机获取深度信息的原理，通过限制其成像深度范围，能够获取轨道上下表面空间内的深度数据，大幅度减少环境分量的影响；结合相机输出的二维图像，确定轨道轮廓，对应截取深度点云数据的轨道空间数据，进一步减少轨道上下表面空间内环境数据的影响，提高测量精度。

总体上，实验结果存在一定误差，最主要的原因是由于 TOF 相机的精度不够以及数量不足。但利用 TOF 相机实现对导轨的实时三维成像是可以实现的，通过在导轨两侧及上方安装 TOF 相机，即三目视觉，同时获得三维空间内轨道的三维点云数据，得到轨道完整的三维结构，进而可以计算出轨道的体积。如果 TOF 相机精度足够高，还能根据重建的轨道结构来判断轨道的表面缺陷。

参考文献

[1] 付文龙,王培俊,李文涛,等.一种新型铁路轨道检测小车的设计与分析[J].中国机械工程,2019,30(3):300-305.

[2] 中华人民共和国铁道部.TG/GW115-2012 高速铁路无砟轨道线路维修规则(试行)[S].北京:中国铁道出版社,2012.

[3] 苟慎龙.三自由度轨道检测平台设计与控制系统研究[D].成都:西南交通大学,2017.

[4] 许学良,马伟斌,蔡德钧,等.铁路隧道检测与监测技术的现状及发展趋势[J].铁道建筑,2018,58(1):14-19.

[5] 黄建坊,李立明,王恩鸿.钢轨表面信息采集系统设计[J].科技展望,2016,26(3):147.

[6] 闵永智,岳彪,马宏锋,等.基于图像灰度梯度特征的钢

轨表面缺陷检测[J].仪器仪表学报,2018,39(4):220-229.

[7] 官鑫,赵智雅,高晓蓉.图像处理技术在钢轨表面缺陷检测和分类中的应用[J].铁路计算机应用,2009,18(6):27-30.

[8] 郝永旺,魏文军,曹玉新,等.基于图像特征的轨道表面缺陷识别研究[J].电子世界,2018(14):5-7.

[9] 姚宗伟,杨宏飞,胡际勇,等.基于机器视觉和卷积神经网络的轨道表面缺陷检测方法[J].铁道学报,2021,43(4):101-107.

[10] 李朴莲.三维成像激光雷达技术最新发展与展望[J].国防技术基础,2003(1):40-41.

[11] 侯飞,郑福,李国栋,等.一种基于飞行时间相机的点云目标提取方法[J].激光与红外,2019,49(11):1381-1387.

[12] 童晶,向学勤,田洪波,等.利用飞行时间三维相机的非刚体形状三维重建[J].计算机辅助设计与图形学学报,2011,23(3):377-384.

[13] 王聪,周忠,吴威.用飞行时间相机优化可视外壳的实时三维重建算法[J].计算机辅助设计与图形学学报,2013,25(4):494-501.

[14] 蔡建国,Dai Fei,RASHIDI A,等.基于图像和飞行时间的基础设施三维重建技术比较[J].四川建材,2021,47(2):39-45.

[15] Lin Jingyu, Wu Rihui, Wang Hongman, et al. Transient imaging with a time-of-flight camera and its applications[J]. Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering, 2017, 18(9): 1268-1277.

[16] 侯飞,韩丰泽,李国栋,等.基于飞行时间的三维成像研究进展和发展趋势[J].导航与控制,2018,17(5):1-7,48.

(收稿日期:2021-12-06)

作者简介:

陈晶晶(1998-),女,硕士,主要研究方向:光电检测技术。

田鹏(1988-),男,博士,副研究员,主要研究方向:光电检测技术。

黄伟(1969-),男,副教授,主要研究方向:光电检测技术和光学测试技术。



扫码下载电子文档

版权声明

经作者授权，本论文版权和信息网络传播权归属于《电子技术应用》杂志，凡未经本刊书面同意任何机构、组织和个人不得擅自复印、汇编、翻译和进行信息网络传播。未经本刊书面同意，禁止一切互联网论文资源平台非法上传、收录本论文。

截至目前，本论文已经授权被中国期刊全文数据库（CNKI）、万方数据知识服务平台、中文科技期刊数据库（维普网）、DOAJ、美国《乌利希期刊指南》、JST 日本科技技术振兴机构数据库等数据库全文收录。

对于违反上述禁止行为并违法使用本论文的机构、组织和个人，本刊将采取一切必要法律行动来维护正当权益。

特此声明！

《电子技术应用》编辑部

中国电子信息产业集团有限公司第六研究所