

基于改进结构光条纹中心提取的三维视觉检测技术

赵卫东, 陈香梅, 程 星

(安徽工业大学 电气与信息工程学院, 安徽 马鞍山 243032)

摘要: 针对工业金属零部件表面质量检测中采集的激光条纹图像存在灰度分布不均等问题, 提出一种基于线结构水平扫描结合改进激光条纹中心提取的三维检测技术。基于调制的线结构光三维计算机视觉技术, 标定工业相机、线结构光平面及水平扫描连续帧的位姿变换; 基于窗口的二维动态阈值灰度加权改进激光条纹中心线提取方法, 提高中心线提取精度。实验结果表明: 采用改进结构光条纹中心提取的三维视觉检测技术重建光滑陶瓷地板表面点云, 深度标准差为 0.09 mm; 采用该技术对高度 10 mm 的金属标准块表面形貌进行检测, 检测精度优于 0.3 mm, 误差在合理范围内。提出的三维检测技术可高效无损伤地实现高精度工业金属零部件的三维检测。

关键词: 线结构光; 中心线提取; 三维重建

中图分类号: TN 249 **文献标志码:** A **doi:** 10.12415/j.issn.1671-7872.22075



3D Vision Inspection Technology Based on Improved Structured Light Stripe Centre Extraction

ZHAO Weidong, CHEN Xiangmei, CHENG Xing

(School of Electrical & Information Engineering, Anhui University of Technology, Maanshan 243032, China)

Abstract: Aiming at the problem of uneven gray distribution of laser stripe images collected in the surface quality inspection of industrial metal parts, a 3D inspection technology based on line structure horizontal scanning combined with improved laser stripe center extraction was proposed. The 3D computer vision technology based on modulated linear structured light was used to calibrate the position and attitude transformation of industrial cameras, the linear structured light planes and horizontal scanning continuous frames. The method of laser stripe centerline extraction was improved by using 2D dynamic threshold gray scale weighting based on window, and the accuracy of centerline extraction was improved. The experimental results show that the 3D vision inspection technology with improved structured light stripe centreline extraction is used to reconstruct the point cloud of smooth ceramic floor surface, and the standard deviation of depth is 0.09 mm. This technology is used to detect the surface morphology of metal standard blocks with a height of 10 mm, and the detection accuracy is better than 0.3 mm, and the error is within a reasonable range. The proposed 3D inspection technology can efficiently and undamaged realize the three-dimensional detection of high-precision industrial metal parts.

Keywords: line structured light; centerline extraction; three-dimensional reconstruction

随着工业制造的发展, 使用三维检测技术^[1]实现对工业产品表面质量的高精度、高效率检测越来越重

收稿日期: 2022-03-08

基金项目: 安徽省自然科学基金项目 (2108085MF225)

作者简介: 赵卫东 (1976—), 男, 安徽阜阳人, 副教授, 主要研究方向为机器视觉、机器人等。

引文格式: 赵卫东, 陈香梅, 程星. 基于改进结构光条纹中心提取的三维视觉检测技术 [J]. 安徽工业大学学报(自然科学版), 2023, 40(1):82-88.

要。早期对物体表面质量的三维检测主要利用接触式的检测方法^[2], 接触式的检测直接接触工件表面易损害工件表面, 且检测速度较低。近年, 随着光电技术、计算机和图像处理技术的快速发展, 计算机技术结合光电设备的非接触式检测方法^[3] 逐渐成为关注的重点, 且在 3D 建模^[4]、立体测距^[5]、工业检测^[6] 及文物保护^[7] 等领域得到应用。

在非接触式测量中, 线结构光三维视觉检测技术通过相机获取线型激光器投射在物体表面的条纹图像, 基于三角测量原理进行空间尺度变换实现对物体表面的三维检测。因其具有测量精度高、结构简单、通用性强及响应速度快等优点, 在工业生产中应用最为广泛。提取经调制的激光条纹中心线是线结构光三维检测技术的关键^[8-10], 提取的方法有极值法^[11]、改进的方向模板方法^[12]、基于海森矩阵的 Steger 算法^[13-14]、灰度重心法^[15]。极值法提取速度快但提取精度不高, 受噪声影响大; 改进的方向模板法和 Steger 算法精度高但数据计算量大; 灰度重心法效率高、使用简单, 但无法兼顾效率和精度。实际应用环境中, 存在工件表面形状复杂、相机与激光发生器安装的相对位置有差异及激光发射器光源不稳定等情况, 致使拍摄的激光条纹灰度分布不均, 存在斑驳、微断裂等现象, 影响测量精度, 难以保证处理速度。针对上述情况, 提出一种基于线结构光水平扫描结合改进激光条纹中心提取的检测技术, 以期高精度稳定地实现金属零部件的无损害在线三维检测。

1 线结构光的水平扫描三维视觉原理

相机采集的物体信息是基于二维平面图像, 要想获取物体更深层次的三维表面信息, 需确定图像二维平面坐标系与三维世界坐标系之间的关系, 线结构光三维视觉检测技术整体实现如图 1。相机的成像模型是基于小孔成像原理, 以此为基础构建相机图像平面坐标系 $O_1 - xy$ 和相机坐标系 $O_c - x_c y_c z_c$, 其中相机光心轴 z_c 垂直于图像平面相交于 O_1 , 两坐标系原点之间的距离是相机焦距 f , 同时在被测物体位置建立世界坐标系 $O_w - x_w y_w z_w$ 。空间被测物体表面点 L 经透视投影成像在图像坐标系下为点 L' , 两者成线性关系, 相机坐标系与世界坐标系之间属于刚体变换, 只存在相机坐标系与世界坐标系之间的位姿变换, 即存在 3×3 的旋转矩阵 R 和 3×1 的平移矩阵 T , 则像素坐标 (u, v) 和世界坐标 (x_w, y_w, z_w) 存在有如下关系:

$$s \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/x_d & 0 & u_0 \\ 0 & 1/y_d & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R & T \\ \vec{0} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: s 为比例因子; x_d 和 y_d 分别为图像平面坐标系中在 x 轴和 y 轴上的单位像素; u_0, v_0 为图像坐标系与像素坐标系原点之间的偏移量。

文中使用张正友标定法^[16] 求解相机成像模型, 再通过改变标定板位置采集不同位置下的激光条纹图像, 使用最小二乘法拟合激光平面方程:

$$Ax_w + By_w + Cz_w + D = 0 \quad (2)$$

式中 A, B, C, D 为拟合平面系数。

为实现沿水平扫描方向对物体表面的三维检测, 还需进一步标定移动平台与相机和线结构光平面的空间位置关系。文中采用基于标定板的移动相机标定方法, 将标定板置于相机视场内, 表面任意特征点 F 随水平平台运动, 运动轨迹为与运动平台平行的空间直线, α 为相对连续两帧标定板上建立的世界坐标系位姿参数。依据 F 点运动轨迹规律, 通过相机采集 Q_1 和 Q_2 不同位移位置下的 2 张标定板图像, 水平扫描移动平台如图 2, 利用标定板角点信息和各

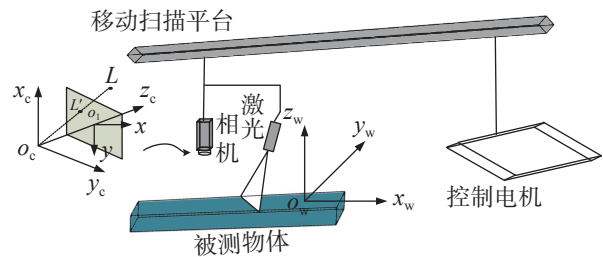


图1 线结构光三维检测模型

Fig. 1 3D inspection model of line structured light

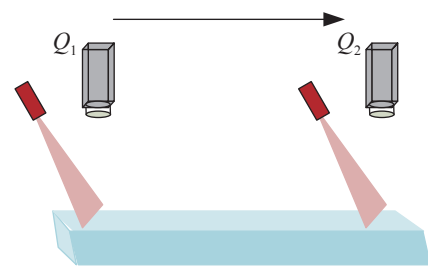


图2 运动平台扫描模型

Fig. 2 Scanning mode I of motion platform

三维坐标系之间的变换关系,确定连续帧之间的平移位姿参数 α 。当激光条纹匀速扫过被测物体整个表面时,即可获取被测物体表面完整的三维信息。

2 激光条纹中心线的提取

当激光条纹投射在简单光滑的物体表面,截面亮度通常符合从中间到两端不断递减的趋势,如图3所示的 Gaussian 分布。灰度重心法是利用 Gaussian 分布特性提取激光条纹中心线,设定灰度分割阈值为 H ,对滤波后的激光条纹图像进行阈值分割处理,大于分割阈值的区间为 (e_0, e) 。将经过预处理的图像逐行进行计算,经阈值分割后通过式(3)可得第 i 行的灰度重心所在亚像素位置 u_i 。

$$u_i = \frac{\sum_{j=e_0}^e jG_j}{\sum_{j=e_0}^e G_j} \quad (3)$$

式中 G_j 为图像中当前行像素中第 j 列的灰度值。

实际测量环境中,采集的激光条纹图像通常受多种因素的影响,截面灰度分布并非呈严格的 Gaussian 分布。对此,提出一种基于窗口的二维动态阈值灰度重心提取激光条纹中心线的方法。权重窗口在计算阈值时能确保像素的选择不再局限于单一像素,能有效降低图像噪声对条纹中心提取的影响。结合二维的灰度权重计算,可避免灰度重心法处理图像时仅计算激光条纹某一方向上灰度值导致的中心点偏移;采用局部候选搜索前进的方式提取激光条纹中心线。提出的方法既可保留灰度重心法的优点,又可提高条纹中心的提取精度。通过如图4所示的一个 3×3 滑动权重窗口由式(4)计算某单个像素灰度值。

$$G(i_0, j_0) = \sum_{a=1}^3 \sum_{b=1}^3 P(a, b)G(i_0 - 2 + a, j_0 - 2 + b) \quad (4)$$

式中: $G(i_0, j_0)$ 为激光条纹 (i_0, j_0) 位置灰度值; $P(a, b)$ 为 3×3 窗口 (a, b) 坐标下的权重。改进激光条纹中心线提取方法的流程图如图5,主要步骤如下:

1) 设定初始灰度阈值为 H_0 、单步递减的灰度值为 σ 、最低灰度阈值为 ρ 、条纹像素宽度阈值为 θ 。 σ 和 ρ 的取值根据实际测试中激光条纹的情况而定, θ 的取值根据实际条纹所占的宽度而定。

2) 由式(4)计算灰度值,判断是否满足阈值 H_0 ,统计符合阈值条件的像素点个数 τ 是否满足设定的 θ 。

3) 当阈值内满足要求的像素点个数符合条件时保留灰度阈值,保存每行符合条件的像素起始列坐标 s_0 和终止列坐标 s ,同时记录当前行中最大灰度值处的列坐标 s_{\max} 。

4) 若不满足设定 θ ,则灰度阈值减去步长 σ ,重复步骤2)和3),重新计算满足要求的像素点个数;

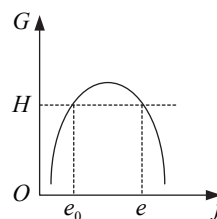


图3 灰度直方图

Fig. 3 Grayscale histogram

| | | |
|-------|-------|-------|
| P_1 | P_2 | P_3 |
| P_4 | P_5 | P_6 |
| P_7 | P_8 | P_9 |

图4 滑动窗口

Fig. 4 Sliding window

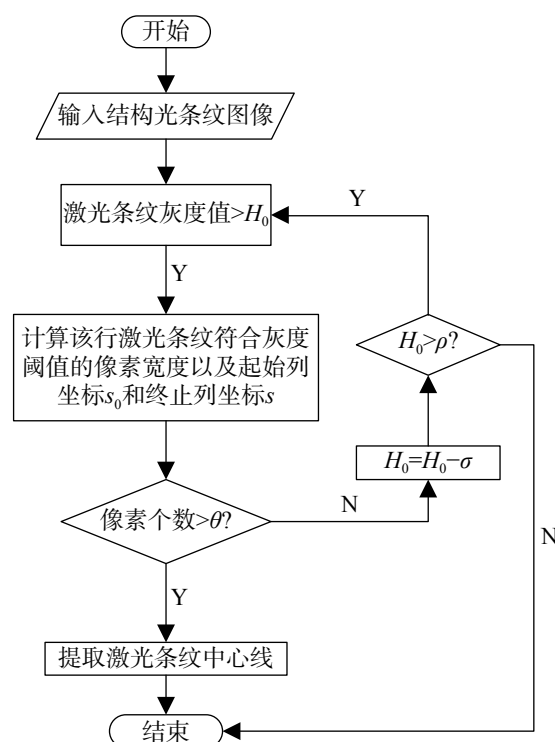


图5 激光条纹中心提取算法流程图

Fig. 5 Flowchart of laser stripe centre extraction algorithm

若重复计算后阈值低于最低阈值 ρ , 则停止该列激光条纹的中心点计算。

5) 在光条像素计算顺序上, 对于当前激光条纹中心位置更新以上一行 s_0 和 s 为初始计算范围, 左右各扩展 1 倍像素宽度为实际计算范围, 重复步骤 1)~3), 若不满足 θ , 则从该行像素初始位置重新循环计算。

依据动态阈值依次逐行计算每行光条纹像素宽度, 通过二次加权灰度重心计算激光条纹列坐标的中心值(式(5)), 二次加权可提高中间亮度高的像素点权重及中心点的精度; 根据每行灰度值最大点 s_{max} , 且结合式(3)和灰度重心法计算激光条纹图像行中心坐标, 如式(6)。

$$u = \frac{\sum_{j=-n+s_0}^{n+s} jG_j^2}{\sum_{j=-n+s_0}^{n+s} G_j^2} \tag{5}$$

$$v = \frac{\sum_{a=1}^3 \sum_{b=1}^3 P(a, b)G(i-2+a, s_{max}-2+b)(i-2+b)}{\sum_{a=1}^3 \sum_{b=1}^3 P(a, b)G(i-2+a, s_{max}-2+b)} \tag{6}$$

其中: n 表示 $(s-s_0)/2$ 向上取整; (i, s_{max}) 为初始激光条纹中心。

3 实验与结果分析

实验平台为波长 530 nm 的红光线形激光发生器及 BASLER 工业相机, 将两者固定于水平移动的控制台。软件开发平台为 Visual Studio 2019, OpenCV3.4.1 和 PCL1.10.0 等。

3.1 三维视觉模块参数标定

三维视觉模块参数包括相机参数、光平面方程系数和移动扫描平台位姿变换参数。利用 Matlab 中相机标定工具结合采集的棋盘格图像计算相机内参值, 结果如表 1, 其中: $f_x = f/x_d$; $f_y = f/y_d$; K_1, K_2 为径向畸变; ξ_1, ξ_2 为切向畸变。固定线激光器和相机的位置, 采用相机采集带和不带激光条纹的靶标图像, 利用式(1)求解相机的外参值旋转矩阵 R 和平移矩阵 T , 同时提取激光条纹中心线的世界坐标 (x_w, y_w, z_w) , 拟合出光平面在世界坐标系下的方程, 光平面方程为 $0.944\ 963x_w + 0.002\ 567\ 01y_w + 0.079\ 35z_w - 47.604\ 8 = 0$ 。利用 Matlab 拟合激光平面, 结果如图 6。移动平台在运动状态时连续帧标定的位姿变换参数 $\alpha = (0.566, 0.026, 0.009)$ 。

表 1 相机内参标定结果

Tab. 1 Calibration results of camera internal parameters

| f_x | f_y | K_1 | K_2 | ξ_1 | ξ_2 | u_0 | v_0 |
|----------|----------|-----------|----------|-----------|-----------|--------|---------|
| 2 122.36 | 2 123.04 | -0.096 45 | 0.125 99 | -0.000 40 | -0.000 40 | 943.35 | 591.115 |

3.2 激光条纹中心线提取效果评价

三维视觉模块标定结束, 对物体进行线激光水平扫描采集激光条纹图像, 部分激光条纹图像如图 7。为比较激光条纹中心提取效果, 分别使用灰度重心法和文中方法提取激光条纹中心线, 结果如图 8。

从图 8 可看出: 使用文中中心线提取方法提取图 7(a) 所示存在分叉的激光条纹中心, 可有效平滑灰度重心法提取中心线中的毛刺, 提取的中心线更精准; 对于图 7(b) 及 (c) 所示的灰度分布不均、条纹法线方向变化大的条纹, 灰度重心法提取的中心线存在多处间断点, 而文中方法可弥补信息丢失现象, 完整提取中心线, 保证信息完整。

为验证文中所提激光条纹中心线提取方法的实用性, 在不同实验环境下, 采集 10 组投射在平面上灰度

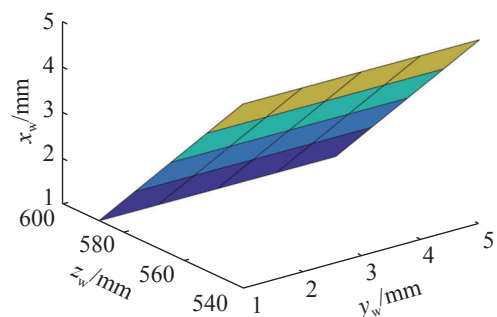


图6 光平面拟合结果

Fig. 6 Light plane fitting results

强度分布不均的激光条纹图像,使用灰度重心法和文中方法提取条纹中心点。选取中心点坐标拟合中心线,选取和方差 (sum of squared error, SSE) 及均方根误差 (root mean square error, RMSE) 评估 2 种方法的提取效果,结果如图 9。SSE 越接近于 0, 条纹中心线拟合效果越好; RMSE 越小, 激光条纹中心的提取精度越高。从图 9 可看出: 对于不同激光条纹图像, 与灰度重心法相比, 文中方法 SSE 减少约 30%, RMSE 也更小。表明文中所提中心线提取方法误差更小、提取结果更精准。

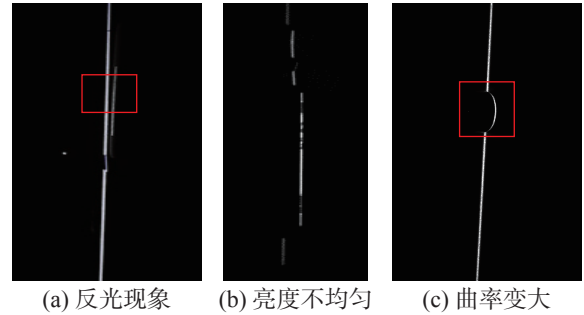


图7 条纹状态

Fig. 7 State of the stripes

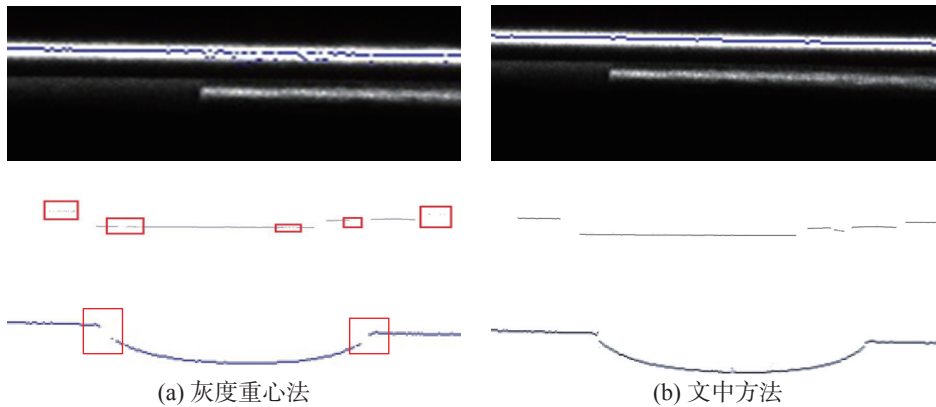


图8 条纹提取中心

Fig. 8 Stripe extraction center

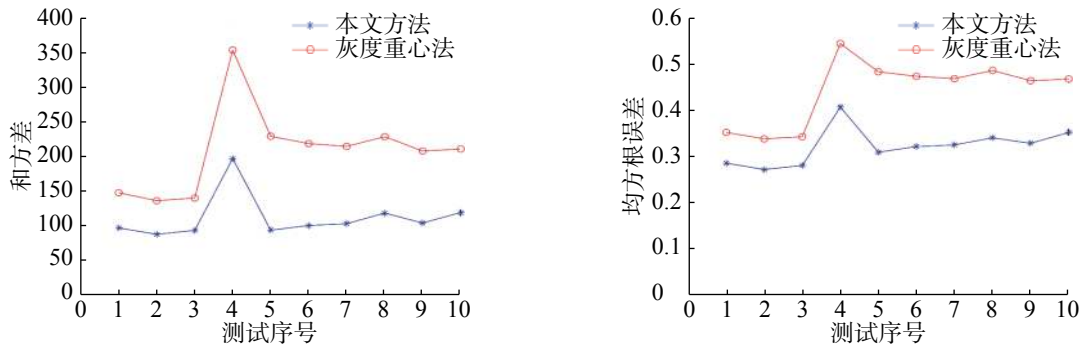


图9 2种方法提取的条纹中心拟合结果

Fig. 9 Fitting results of stripe center extracted by two methods

激光条纹中心线的提取是视觉检测技术的关键步骤,中心线提取方法的运行效率也是一项重要指标。在不同实验环境下,取 10 组不同激光条纹图像,每组激光条纹图像使用文中方法、灰度重心法、Steger 法分别提取中心线 10 次,计算 3 种方法提取各组中心线时间的平均值,结果如图 10。由图 10 可看出: 上述 3 种方法的平均提取时间分别为 0.031 73, 0.038 32, 0.110 88 s; 与灰度重心法相比, 文中方法提取速度略有提升; 与 Steger 法相比, 文中方法提取速度提高近 3 倍。

3.3 三维视觉检测技术精度评价

对光滑陶瓷地板进行线激光水平扫描, 分别使用文中方法和灰度重心法提取中心线, 结合式 (1) 重建该陶瓷地板点云数据, 重建数据深度的标准差如表 2。

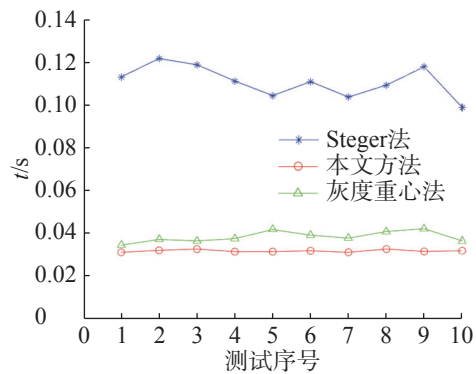


图10 3种方法条纹中心的提取时间

Fig. 10 Extraction time of stripe center by three methods

重建数据深度的标准差如表 2。

从表 2 可看出: 与灰度重心法相比, 文中方法在经过后续重建处理, 点云数据标准差在 0.09 mm 左右, 中心点坐标的偏差更低。

将标准金属工件置于相机视场内, 以固定速度进行扫描, 利用文中激光条纹中心提取方法, 结合视觉模块和平移装置的标定结果对标准块进行检测, 三维重建效果如图 11。工件深度为 10 mm, 选取工件 40 个点计算点云深度, 平均误差在 0.3 mm 内。

综上, 基于窗口的二维动态阈值灰度加权重心法, 对激光条纹中心线的提取效果好于灰度重心法, 在点云三维重建时可有效避免噪声点的影响, 可为后续点云重建物体的精度计算提供一个较好的基础。提出的线结构光条纹中心提取的三维视觉检测技术可有效检测金属标准块表面形貌。

4 结 论

针对接触式三维检测无法高效无损害地实现工业金属零部件的三维检测, 提出一种改进结构光条纹中心线提取的水平扫描三维视觉检测技术。采用水平运动装置固定相机和激光器, 动态扫描待测物体实现三维重建; 采用基于窗口的二维动态阈值灰度加权提取条纹中心线的方法, 减少中心点的偏移误差, 提高点云数据的完整行, 保证条纹中心的提取精度。采用提出的三维视觉检测技术重建光滑陶瓷地板表面点云, 深度标准差在 0.09 mm; 检测高度为 10 mm 金属块表面形貌, 精度优于 0.3 mm, 误差在合理范围内。由此表明, 提出的三维视觉检测技术可高效无损伤地实现高精度的工业金属零部件三维检测。

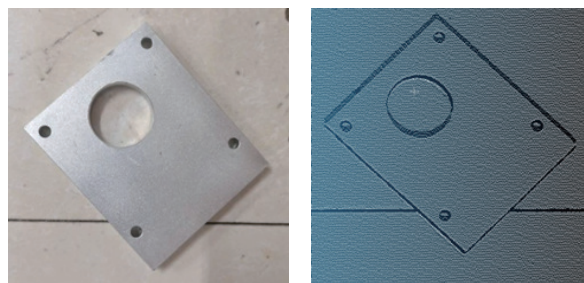
参考文献:

- [1] 丘岳栋, 苏建明, 杨广昊, 等. 三维视觉检测技术在发动机装配中的应用[J]. 装备制造技术, 2020(5):164-166,173.
- [2] 李斌, 陈佳夷, 王海超, 等. 椭圆面反射镜的光轴引出方法[J]. 应用光学, 2018, 39(6):791-795.
- [3] LI Z, CUI J, WU J, et al. A uniform and flexible model for three-dimensional measurement of line-structured light sensor[C]//Tenth International Symposium on Precision Engineering Measurements and Instrumentation. Bellingham, Washington, USA:SPIE, 2019, 11053:1209-1217.
- [4] WANG C, WEN C, DAI Y, et al. Urban 3D modeling with mobile laser scanning: a review[J]. Virtual Reality & Intelligent Hardware, 2020, 2(3):175-212.
- [5] 吴培鹏, 蔡文郁, 唐国栋, 等. 激光测距动态多阈值误差修正技术研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2021, 35(7):170-177.
- [6] LU Z, FAN J, HOU Z, et al. Automatic 3D seam extraction method for welding robot based on monocular structured light[J]. IEEE Sensors Journal, 2021, 21(14):16359-16370.
- [7] GAUTIE Q K, GARRISON T G, RUSHTON F, et al. Low-cost 3D scanning systems for cultural heritage documentation[J]. Journal of Cultural Heritage Management and Sustainable Development, 2020, 10(4):437-455.
- [8] ZHANG S. High-speed 3D shape measurement with structured light methods: a review[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2018, 106:119-131.
- [9] WU F, MAO J, ZHOU Y, et al. Three-line structured light measurement system and its application in ball diameter measurement[J]. Optik, 2018, 157:222-229.
- [10] 宋晓凤, 李居朋, 陈后金, 等. 多场景下结构光三维测量激光中心线提取方法[J]. 红外与激光工程, 2020, 49(1):213-220.

表 2 光滑陶瓷地板重建深度的标准差

Tab. 2 Standard deviation of reconstruction depth for smooth ceramic floors

| 条纹序号 | 标准差/mm | |
|------|---------|---------|
| | 文中方法 | 灰度重心法 |
| 1 | 0.094 4 | 0.223 1 |
| 2 | 0.092 5 | 0.229 4 |
| 3 | 0.091 4 | 0.218 9 |
| 4 | 0.098 2 | 0.225 8 |
| 5 | 0.090 2 | 0.221 6 |
| 6 | 0.092 2 | 0.211 2 |
| 7 | 0.086 3 | 0.212 2 |
| 8 | 0.082 7 | 0.197 5 |
| 9 | 0.093 9 | 0.213 0 |
| 10 | 0.083 9 | 0.215 2 |



(a) 原始标准金属块 (b) 标准金属块三维点云重建

图 11 金属工件原图及重建后三维点云图

Fig. 11 Original drawing of metal workpiece and 3D point cloud after reconstruction

- [11] 罗山, 张冬梅. 基于自适应阈值和形态学的改进分水岭分割算法[J]. *山西电子技术*, 2018(6):3-5.
- [12] 王泽浩, 张中炜. 自适应方向模板线结构光条纹中心提取方法[J]. *激光杂志*, 2017, 38(1):60-64.
- [13] YU W, LI Y, YANG H, et al. The centerline extraction algorithm of weld line structured light stripe based on pyramid scene parsing network[J]. *IEEE Access*, 2021, 9:105144-105152.
- [14] XU X, FEI Z, TAN Z, et al. Improved calibration method based on the RANSAC approach and an improved gray centroid method for a laser-line-based structured light system[J]. *Applied Optics*, 2019, 58(35):9603-9613.
- [15] JIAN X, CHEN X, HE W, et al. Outdoor 3D reconstruction method based on multi-line laser and binocular vision[J]. *IFAC-Papers On Line*, 2020, 53(2):9554-9559.
- [16] ZHANG Z. A flexible new technique for camera calibration[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2000, 22(11):1330-1334.

责任编辑: 何莉

(上接第 69 页)

- [7] FENG L, ZHAO C. Fault description based attribute transfer for zero-sample industrial fault diagnosis[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2020, 17(3):1852-1862.
- [8] ZHANG J, WANG P, YAN R, et al. Long short-term memory for machine remaining life prediction[J]. *Journal of Manufacturing Systems*, 2018, 48:78-86.
- [9] 白浩, 周长城, 袁智勇, 等. 基于数字孪生的数字电网展望和思考[J]. *南方电网技术*, 2020, 14(8):18-24,40.
- [10] 周瑜, 刘春成. 雄安新区建设数字孪生城市的逻辑与创新[J]. *城市发展研究*, 2018, 25(10):60-67.
- [11] 陶飞, 戚庆林. 面向服务的智能制造[J]. *机械工程学报*, 2018, 54(16):11-23.
- [12] MARTINEZ G M C, AVILES L A Z. Design methodology for rehabilitation robots: application in an exoskeleton for upper limb rehabilitation[J]. *Applied Sciences*, 2020, 10(16):5459.
- [13] WANG W, HE Y, LI F, et al. Digital twin rehabilitation system based on self-balancing lower limb exoskeleton[J]. *Technology and Health Care*, 2022(Preprint):1-13.
- [14] 储继发. 多位姿下肢康复机器人设计与样机研制[D]. 马鞍山: 安徽工业大学, 2019:8-44.
- [15] 洪炳熔, 贺怀清. 虚拟人的步行和跑步运动控制方法的研究[J]. *高技术通讯*, 2001(3):91-95.
- [16] 雷全智. 基于UNITY技术的三维课件开发与实现[J]. *南昌师范学院学报*, 2018, 39(6):25-28.
- [17] 李国胜, 边朝辉, 刘明礼. 胫骨平台骨折的手术治疗选择及疗效分析[J]. *中国骨与关节损伤杂志*, 2017, 32(12):1305-1307.

责任编辑: 丁吉海