

激光与光电子学进展

利用线结构光的异型微小构件几何尺寸测量方法

马自勇^{1,2*}, 张富泉¹, 马立东¹, 马贺琛¹, 杭嘉濠²¹太原科技大学机械工程学院, 山西 太原 030024;²海安太原科大高端装备及轨道交通技术研发中心, 江苏 海安 226600

摘要 异型微小构件是一种通过轧制、挤压、拉拔等工艺制成的形状复杂、加工边界不规则的结构件,被广泛应用于高端钟表、电子五金、医疗器材等行业。在目前的生产过程中,多通过人工利用显微镜实现异型微小构件的几何尺寸测量,存在劳动强度大、生产效率低、测量精度不稳定等问题。鉴于此,提出一种利用线结构光的异型微小构件几何尺寸测量方法。首先,利用张正友标定法获取工业相机内外参数和畸变系数,结合 Steger 细化法和最小二乘法对线结构光平面进行标定;其次,基于 Microsoft Foundation Classes 和 OpenCV 编制异型微小构件几何尺寸测量程序;最后,利用标准量块对该方法的测量精度和可重复性进行评价,开展 3 种规格的异型微小构件几何尺寸测量试验。结果表明,无论是在宽度方向还是高度方向,该方法的整体测量误差均小于 0.1 mm。该方法达到了较高的测量精度,能满足实际生产需求。

关键词 数字图像处理; 线结构光; 异型构件; 参数标定; 测量试验

中图分类号 TM930.1

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP221868

Line-Structured Light Based Micro-Irregular Component Geometric Dimension Measurement Method

Ma Ziyong^{1,2*}, Zhang Fuquan¹, Ma Lidong¹, Ma Hechen¹, Hang Jiahao²¹School of Mechanical Engineering, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan 030024, Shanxi, China;²High-End Equipment and Rail Transit Technology R&D Center of Haian Taiyuan University of Science and Technology, Haian 226600, Jiangsu, China

Abstract Micro-irregular components manufactured via rolling, extrusion, and drawing have complex shapes with irregular processing sections. This structural element is widely utilized in devices such as high-end clocks, electronics, and medical appliances. Currently, the geometric dimension measurements of micro-irregular components are realized by using a microscope during the manufacturing process. However, this method is labor intensive with low production efficiency and unstable measurement accuracy. Therefore, a line-structured light based micro-irregular component geometric dimension measurement method is proposed in this study. First, the internal and external parameters as well as the distortion coefficients of the industrial camera are obtained by implementing the calibration method by Zhang Zhengyou, while the line-structured light plane is calibrated using the Steger thinning method and least squares method. Second, a micro-irregular component geometric dimension measurement program is developed using Microsoft Foundation Classes and OpenCV. Finally, the measurement accuracy and repeatability of the method are evaluated by using the standard gauge block and the geometric dimension measurement test of three kinds of micro-irregular component. The results reveal that the overall measurement errors of this method are less than 0.1 mm in both width and height, achieving high measurement accuracy to meet the needs of actual production.

Key words digital image processing; line-structured light; irregular component; parameter calibration; measurement test

1 引言

异型微小构件是一种具有非规则几何形状的金属

型材,因其形状各异、规格多样、性能优异、使用方便等优点,在高端钟表、电子五金、医疗器材等行业应用广泛。为了满足越来越高的对异型微小构件几何尺寸的

收稿日期: 2022-06-20; 修回日期: 2022-07-16; 录用日期: 2022-08-04; 网络首发日期: 2022-08-15

基金项目: 山西省应用基础研究计划面上青年项目(201901D211292)、山西省关键核心技术和共性技术研发攻关专项项目(2020XXX009)、来晋工作优秀博士奖励资金(20202036)、太原科技大学研究生创新项目(XCX212051, XCX212056)

通信作者: *zyma_sc@tyust.edu.cn

精度要求,在构件成形过程中进行实时检测是一种有效方法;但由于成形过程速度快且伴随偶然振动与抖动,接触测量方式难以实现。目前,异型微小构件几何尺寸的测量方法是先进行切段操作,然后利用显微镜对切段截面进行测量,在测量结果满足精度要求后,再进行全料生产。这种方式存在生产效率低、劳动强度高、对工人素质的依赖程度深等问题。作为一种新型非接触式测量方法^[1-2],线结构光测量目前已在工业生产中得到广泛应用,具有精度高、测量方便、实时性强等优点^[3-6]。因此,利用线结构光测量异型微小构件几何尺寸的研究具有重要的理论意义和工业应用价值。

近年来,国内外学者对线结构光测量进行了深入研究:王华等^[7]基于 GA-BP 算法对线结构光立体视觉检测系统的测量误差进行补偿,该方法的测量精度在 0.05 mm 以内;程锦等^[8]设计了一种基于线结构光的大型圆柱工件直径测量系统,该系统可在设计的待测值附近准确测量工件的端面直径,测量精度在 ± 0.1 mm 以内;张翠翠等^[9]通过线结构光测量系统对轴径进行测量,当被测轴径为 30~50 mm 时,该系统的最大测量误差为 0.05 mm;王乐等^[10]利用线结构光检测钢轨扣件紧固状态,实现 80% 以上的平均检出率,且该方法对 9 mm 厚度标准量块的试验室静态检测精度达到 0.1 mm;陈东旭等^[11]利用基于线结构光的机器人视觉系统对焊缝位姿进行识别,结果表明,该系统在深度方向对多个焊缝点的平均测量误差为 0.57 mm;张旭等^[12]通过平面靶标对激光平面进行标定,并对无激光的靶标图像进行迭代摄像机标定,使得两标准球球心距离的平均测量误差为 0.24 mm;李志宇等^[13]利用高精度靶标对相机参数进行标定,并对零件表面 2~4 mm 圆形特征进行测量,发现半径的最大测量误差为 0.04 mm;Guo 等^[14]和 Shang 等^[15]借助高精度辅助设备,利用线结构光分别对齿轮的齿距和齿廓进行测量,其中齿距测量的累计偏差为 0.019 mm,齿廓测量误差为 $\pm 2.2 \mu\text{m}$;Wang 等^[16]提出了一种采用平面目标创建特征线,并采用线性导轨作为约束的直接系统标定方法,该方法的平均绝对误差为 0.026 mm。由上述研究可知,利用线结构光对大中型物体的尺寸进行测量,具有速度快、精度高等优点,完全能够满足实际工业生产的需求,但对小型物体的精准测量需借助昂贵的辅助设备,成本较高。

针对实际生产过程中异型微小构件几何尺寸测量存在劳动强度大、生产效率低、测量精度不稳定等问题,本文提出一种利用线结构光的异型微小构件几何尺寸测量方法。首先,利用张正友标定法和 MATLAB 标定模块确定工业相机内外参数以及畸变系数,完成对工业相机的高精度标定;然后,通过 Steger 细化法对不同姿态下棋盘格平面上的结构光条纹进行细化处理,结合最小二乘法将细化的多个结构光条纹上的特定特征点进行平面拟合,获取工业相机

坐标系下的结构光平面方程,完成对结构光平面的高精度标定;最后,基于 Microsoft Foundation Classes 和 OpenCV 编制异型微小构件几何尺寸测量程序,利用标准量块进行测量精度评价,同时,开展 3 种规格的异型微小构件几何尺寸测量试验。

2 测量系统组成

基于线结构光的异型微小构件几何尺寸测量系统主要包括工业相机、一字线激光器及其配件,如图 1 所示。工业相机和线激光器安装在同一水平线上,水平距离和竖直距离均为 450 mm,即工业相机轴线与结构光平面呈 45° 夹角。其中,线激光器竖直向下投射出的线结构光与异型微小构件轴线垂直,并在其表面形成一条高亮的激光轮廓线条。系统安装完成后,对工业相机的焦距、光圈、曝光时间,以及线激光器投射的光条纹的宽度进行微调,同时对异型微小构件表面的激光轮廓线条进行图像采集,如图 2 所示。

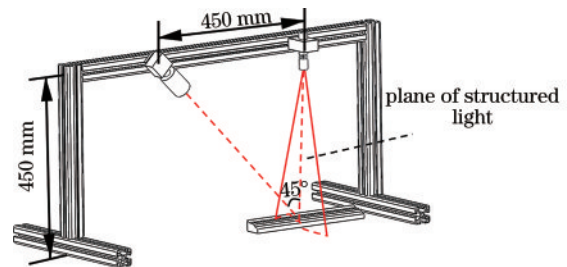


图 1 测量系统组成

Fig. 1 Composition of the measuring system

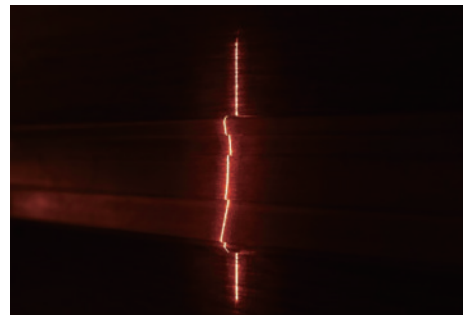


图 2 异型微小构件轮廓采集图像

Fig. 2 Image of profile of micro irregular component

3 测量系统参数标定

利用线结构光对异型微小构件的几何尺寸进行测量之前,须完成线结构光测量系统参数的标定,即工业相机参数标定和线结构光平面标定。采用基于二维平面靶标的张正友传统标定算法,获取工业相机的内外参数、畸变系数,并通过最小二乘法将空间中多组结构光线条上的特定特征点进行拟合,得到结构光平面在相机坐标系下的平面方程,建立结构光平面上的点在像素坐标系与世界坐标系之间的转换关系。

3.1 工业相机参数标定

3.1.1 标定原理

工业相机的成像模型如图 3 所示,图中: $O_c-X_cY_cZ_c$ 为相机坐标系, $o-uv$ 为像素坐标系, $O-XY$ 为图像坐标系, $O_w-X_wY_wZ_w$ 为世界坐标系; P 为世界坐标系中的一点, p 为其在像素坐标系中的对应点。

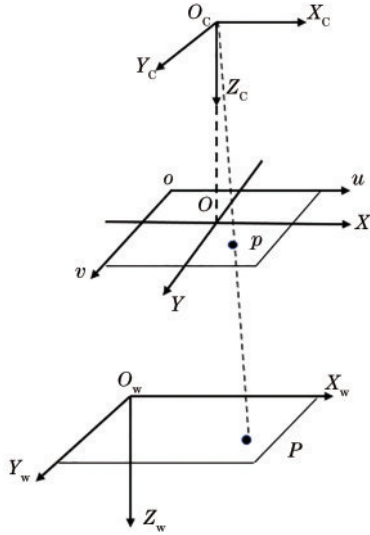


图 3 相机成像模型

Fig. 3 Camera imaging model

假设空间中 P 点坐标为 P , 则其在不同坐标系中的转换关系为

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_x & 0 & u_0 & 0 \\ 0 & f_y & v_0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & t_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & t_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & t_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{Q} & \mathbf{0}^T \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{R} & \mathbf{T} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} P, \quad (1)$$

式中: s 为比例因子; (u, v) 为 P 点在像素坐标系下的坐标; $f_x=f/d_x, f_y=f/d_y, f$ 为工业相机的焦距, d_x, d_y 为工业相机单个像素的物理尺寸; (u_0, v_0) 为光心的投影中心; (x_w, y_w, z_w) 为 P 点在世界坐标系中的坐标; \mathbf{Q} 为

3×3 透视变换矩阵; $\mathbf{R} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix}$, 为 3×3 正交单

位矩阵,是世界坐标系到相机坐标系的旋转矩阵; $\mathbf{T} = [t_x \ t_y \ t_z]^T$, 为 3×1 矩阵,是世界坐标系到相机坐标系的平移矩阵。

利用二维平面棋盘格进行标定,以棋盘格平面建立世界坐标系 $O_w-X_wY_wZ_w$, 则棋盘格平面方程为 $Z_w=0$ 。当空间点 P 在棋盘格平面上时,其坐标可记为 $(x_w, y_w, 0)$, 则式(1)可变为

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \lambda \begin{bmatrix} f_x & 0 & u_0 \\ 0 & f_y & v_0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & t_x \\ r_{21} & r_{22} & t_y \\ r_{31} & r_{32} & t_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ 1 \end{bmatrix} = \lambda \mathbf{H} \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

式中: λ 为尺度因子; \mathbf{H} 为世界坐标系和像素坐标系之间位置关系的单应性矩阵,可表示为

$$\mathbf{H} = \lambda \begin{bmatrix} f_x & 0 & u_0 \\ 0 & f_y & v_0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & t_x \\ r_{21} & r_{22} & t_y \\ r_{31} & r_{32} & t_z \end{bmatrix}, \quad (3)$$

设 $\mathbf{H} = [\mathbf{h}_1, \mathbf{h}_2, \mathbf{h}_3]$ 。由式(2)和式(3)可知,世界坐标系中, P 与像素坐标系中的 p 点坐标 p 之间的转换关系为^[17]

$$p = \lambda \cdot \mathbf{Q} \cdot [\mathbf{r}_1 \ \mathbf{r}_2 \ \mathbf{T}] \cdot P = \lambda \cdot [\mathbf{h}_1 \ \mathbf{h}_2 \ \mathbf{h}_3] \cdot P, \quad (4)$$

式中: $\mathbf{r}_1 = [r_{11} \ r_{12} \ r_{13}]^T$ 和 $\mathbf{r}_2 = [r_{21} \ r_{22} \ r_{23}]^T$ 为棋盘格平面世界坐标系到相机坐标系的旋转矩阵 \mathbf{R} 中的列向量。

世界坐标系到相机坐标系的旋转矩阵 \mathbf{R} 和平移矩阵 \mathbf{T} 也可以表示为^[17]

$$\begin{cases} \mathbf{r}_1 = \lambda \cdot \mathbf{Q}^{-1} \cdot \mathbf{h}_1 \\ \mathbf{r}_2 = \lambda \cdot \mathbf{Q}^{-1} \cdot \mathbf{h}_2 \\ \mathbf{r}_3 = \mathbf{r}_1 \cdot \mathbf{r}_2 \\ \mathbf{T} = \lambda \cdot \mathbf{Q}^{-1} \cdot \mathbf{h}_3 \end{cases}, \quad (5)$$

式中: \mathbf{r}_3 为棋盘格平面世界坐标系到相机坐标系的旋转矩阵 \mathbf{R} 中的列向量。

由旋转矩阵 \mathbf{R} 的正交性可知 $\|\mathbf{r}_1\| = \|\mathbf{r}_2\| = 1$, 则式(5)中 $\lambda = 1/(\|\mathbf{Q}^{-1} \cdot \mathbf{h}_1\|) = 1/(\|\mathbf{Q}^{-1} \cdot \mathbf{h}_2\|)$ 。由此,可求得相机内部透视变换矩阵以及世界坐标系到相机坐标系的旋转矩阵 \mathbf{R} 和平移矩阵 \mathbf{T} 。

3.1.2 标定试验

在相机内外参数标定过程中,变动棋盘格标定板姿态 20 次,确保线结构光与标定板空白部分相交,形成一条光亮的结构光条纹,且该条纹位于工业相机视野内。标定板为 12×9 的棋盘格,角点数为 11×8 ,方格大小为 $3 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$,制造精度为 $\pm 0.01 \text{ mm}$;工业相机为大恒水星系列 ME2P-1230-9GC-P 型,分辨率为 $4096 \text{ pixel} \times 3000 \text{ pixel}$,光学尺寸为 1.1 inch (2.794 cm);工业相机镜头为 KOWA LM35FC24M 系列定焦镜头,视场角为 $22.1^\circ \times 16.7^\circ$;一字线激光器型号为 FU650AB100-GD16-015。

将拍摄的 20 张不同位姿的棋盘格图像导入 MATLAB camera calibration toolbox 工具箱进行标定,获取工业相机的内、外部参数。外部参数为每个位置棋盘格图像上的世界坐标系与工业相机坐标系之间的转换矩阵 \mathbf{R}_i 和 $\mathbf{T}_i (i=1, 2, \dots, 20)$, 内部参数如表 1 所示,其中 k_1, k_2 为径向畸变系数。

已知标定板平面上的棋盘格角点在世界坐标系中的坐标和标定得到的相机内部参数、畸变系数,以及外部参数 \mathbf{R}_i 和 \mathbf{T}_i , 通过式(3)求得角点在像素坐标系下的坐标,将其与图像中直接提取出来的像素坐标进行对比,得到各个姿态下所有角点的平均误差。得到的平均误差为 0.07348 pixel ,表明相机具有较高的精度。

表 1 工业相机内部参数

Table 1 Internal parameters of industrial camera

| Internal parameter | f_x | f_y | u_0 | v_0 | k_1 | k_2 |
|--------------------|-------------|-------------|------------|------------|----------|---------|
| Value | 10727.18454 | 10665.96410 | 1959.57724 | 1437.57213 | -0.06288 | 4.67621 |

3.2 线结构光平面参数标定

3.2.1 激光条纹细化

实际标定过程中,线结构光条纹与棋盘格相交,引起图像变形,导致线结构光条纹与棋盘格角点位置发生变化,从而影响标定精度。为此,将线结构光条纹照射在标定板的空白部分。为了保证线结

构光条纹中心提取的准确性与直线性,先对带有线结构光条纹的图像进行畸变矫正处理;然后,通过 Otsu 算法^[18]得到线结构光条纹的分割阈值;最后,采用精度较高、稳定性较好的 Steger 细化法对线结构光条纹进行细化。细化前与细化后的图像如图 4 所示。

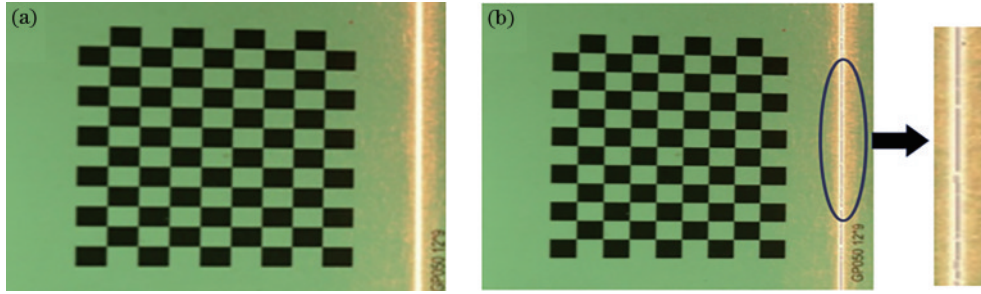


图 4 线结构光条纹。(a)原始线结构光条纹;(b) Steger 细化后的线结构光条纹

Fig. 4 Line-structured light. (a) Original image of line-structured light; (b) Steger thinning image of line-structured light

3.2.2 线结构光平面拟合

在完成工业相机标定与线结构光条纹 Steger 细化的基础上,对线结构光平面进行最小二乘法拟合,获得工业相机坐标系下的线结构光平面方程,从而进一步得到线结构光平面上的点在像素坐标系与相机坐标系之间的转换关系。

首先,过工业相机光心(相机坐标系的原点 O_c)与图像上直线 l_{ab} 确定一个平面,平面方程^[19]为

$$\alpha \cdot x_c + \beta \cdot y_c + \gamma \cdot z_c = 0, \quad (6)$$

式中: α, β, γ 为方程参数。

其次,在棋盘格靶标平面上建立世界坐标系 $O_w - X_w Y_w Z_w$,使 $O_w - X_w Y_w$ 平面与棋盘格靶标平面重合,再用右手法则确定 Z_w 轴,如图 5 所示。其中, P 点在世界坐标系 $O_w - X_w Y_w Z_w$ 下的坐标与在相机坐标系 $O_c - X_c Y_c Z_c$ 下的坐标的转换关系为

$$\begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} t_x \\ t_y \\ t_z \end{bmatrix}. \quad (7)$$

联立式(6)和式(7),可以得到

$$y_w = \frac{\alpha(r_{11} \cdot y_w + t_x) + \beta(r_{21} \cdot x_w + t_y) + \gamma(r_{31} \cdot x_w + t_z)}{\alpha \cdot r_{12} + \beta \cdot r_{22} + \gamma \cdot r_{32}}. \quad (8)$$

已知棋盘格上小方格尺寸为 $3 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$,可知空间点 P 在棋盘格靶标平面($O_w - X_w Y_w$)上的 x_w 值,如图 6 所示。代入式(8)可计算出 y_w 的值,从而得到 P 点在世界坐标系($O_w - X_w Y_w Z_w$)下的坐标($x_w, y_w, 0$),再

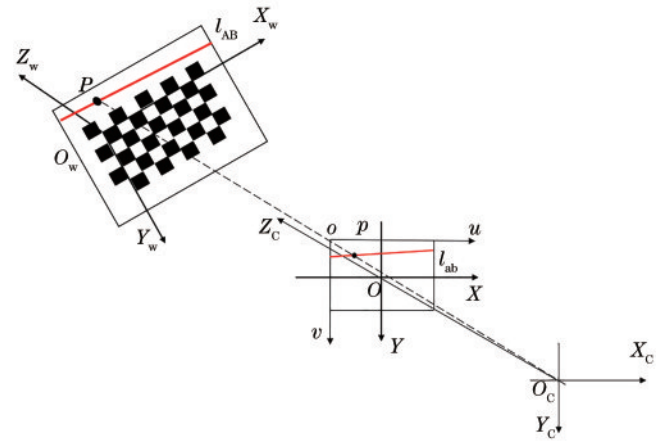


图 5 线结构光数学模型

Fig. 5 Mathematical model of line-structured light

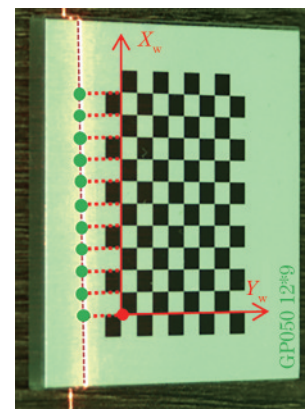


图 6 线结构光中心特征点选取

Fig. 6 Selection of central feature points of line-structured light

通过式 (7) 可计算得到 P 点在相机坐标系 ($O_c-X_cY_cZ_c$) 下的坐标 (x_c, y_c, z_c)。

将计算出的标定板平面上多个特征点在相机坐标系下的坐标进行最小二乘法拟合,可以得到相机坐标系下的线结构光平面方程

$$\alpha_c \cdot x_c + \beta_c \cdot y_c + \gamma_c \cdot z_c + \delta_c = 0, \quad (9)$$

式中: $\alpha_c, \beta_c, \gamma_c, \delta_c$ 为激光平面在工业相机坐标系 $O_c-X_cY_cZ_c$ 下的平面方程系数。

将多条线结构光条纹中的数据点进行最小二乘法拟合,得到工业相机坐标系下的线结构光平面,如图 7 所示。其线结构光平面方程各系数如表 2 所示。

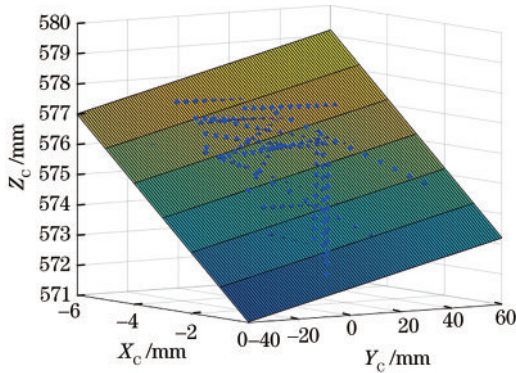


图 7 最小二乘法拟合平面

Fig. 7 Least square fitting plane

表 2 线结构光平面方程系数

Table 2 Plane equation coefficients of line-structured light

| Parameter | α_c | β_c | γ_c | δ_c |
|-----------|------------|-----------|------------|------------|
| Value | -0.99553 | 0.02163 | -1.00000 | 571.89965 |

最终,可以在已知线结构光照射到空间中的某一点像素坐标系(以 pixel 为单位)下的坐标 (u, v) 时,计算出该点在相机坐标系(以 mm 为单位)下的坐标 (x_c, y_c, z_c),其转换关系为

$$z_c \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_x & 0 & u_0 & 0 \\ 0 & f_y & v_0 & 0 \\ -\frac{\alpha_c}{\gamma_c} & -\frac{\beta_c}{\gamma_c} & 0 & -\frac{\delta_c}{\gamma_c} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 10874.44 & 0 & 1987.78 & 0 \\ 0 & 10852.3 & 1447.94 & 0 \\ -1.03866 & 0.02425 & 0 & 518.12585 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (10)$$

通过计算拟合的线结构光平面与拟合数据点之间的距离偏差来评估线结构光平面的拟合效果,距离偏差如图 8 所示。线结构光的投射偏差导致选取图像的边缘特征点偏差较大,线结构光平面的整体拟合精度评价如表 3 所示,点到平面距离的均方根(RMS)误差为 0.067 mm,线结构光平面拟合精度较高。

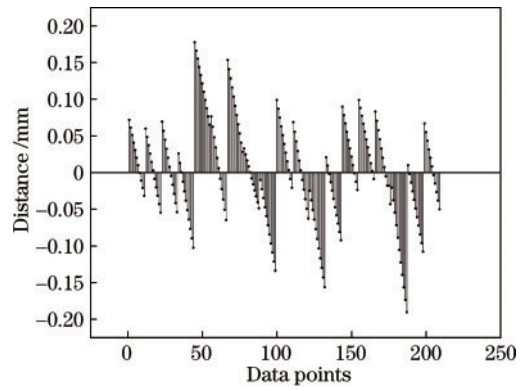


图 8 拟合特征点到线结构光平面的距离

Fig. 8 Distance between fitting points and line-structured light plane

表 3 线结构光平面整体拟合精度评价

Table 3 Fitting accuracy evaluation of line-structured light plane

| Parameter | Average deviation | Standard deviation | RMS |
|-----------|-------------------|--------------------|-------|
| Value /mm | 0.053 | 0.041 | 0.067 |

4 试验验证

4.1 测量系统精度验证

为了评估系统的测量效果,在完成对相机内、外部参数和线结构光平面参数的标定的基础上,通过重复测量 11 种不同厚度标准量块的高度值以及宽度值(精度为 $1 \mu\text{m}$),来检验该测量系统在高度方向与宽度方向的测量精度,如图 9(a)、10(a)所示。11 种不同量块的宽度方向实际值通过螺旋测微器测量,测量结果均为 8.900 mm。11 种量块对应的实际厚度值如表 4 所示。

由图 9(b)可知,量块 10# 第 1 次和第 3 次测量的误差最大,为 0.081 mm;量块 2# 第 6 次和第 7 次测量的误差最小,为 0.002 mm。与此同时,量块高度方向的测量误差标准差在 0.011~0.030 mm 范围内变化,如图 9(c)所示,说明不同量块高度方向的 10 次重复测量值波动较小。量块 9# 高度方向的重复测量误差标准差最大,为 0.030 mm;量块 11# 高度方向的重复测量误差标准差最小,为 0.011 mm。

不同量块宽度 10 次测量值均在 8.900 mm 左右。量块 8# 宽度第 1 次测量误差最大,为 -0.088 mm;量块 1# 宽度第 1 次和第 3 次测量误差最小,为 -0.002 mm,如图 10(b)所示。此外,量块宽度方向的 10 次重复测量值变化比较小。量块 9# 宽度方向的重复测量误差标准差最大,为 0.036 mm;量块 1# 宽度方向的重复测量误差标准差最小,为 0.008 mm。标准差整体在 0.008~0.036 mm 范围内变化,如图 10(c)所示。

通过 11 种标准量块的宽度方向以及高度方向的多次测量,比较所采用方法与基于多结构光线条直线方程拟合方法,如表 5 所示。无论是标准量块的高度

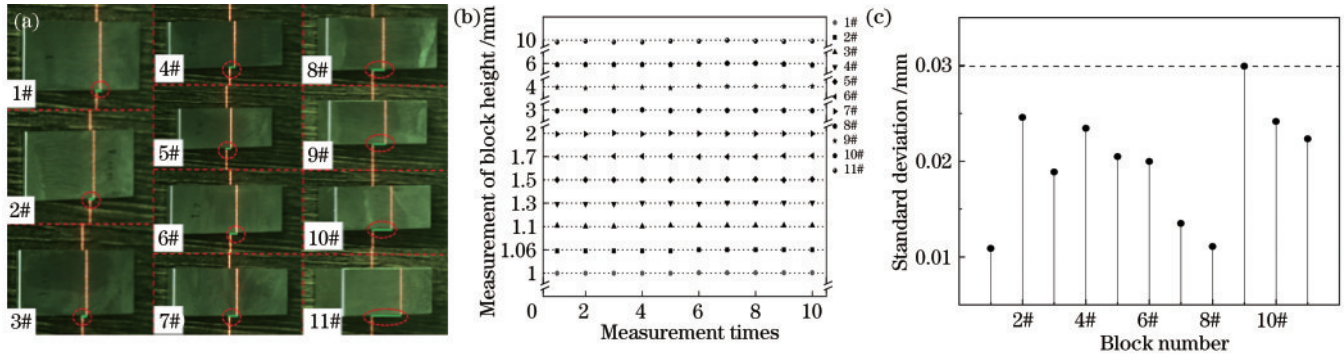


图9 不同量块高度测量。(a)原始高度;(b)高度测量值;(c)高度方向的重复测量误差标准差

Fig. 9 Height measurement of different gauge blocks. (a) Original heights; (b) height measurements; (c) standard deviations of repeated measurement error in height

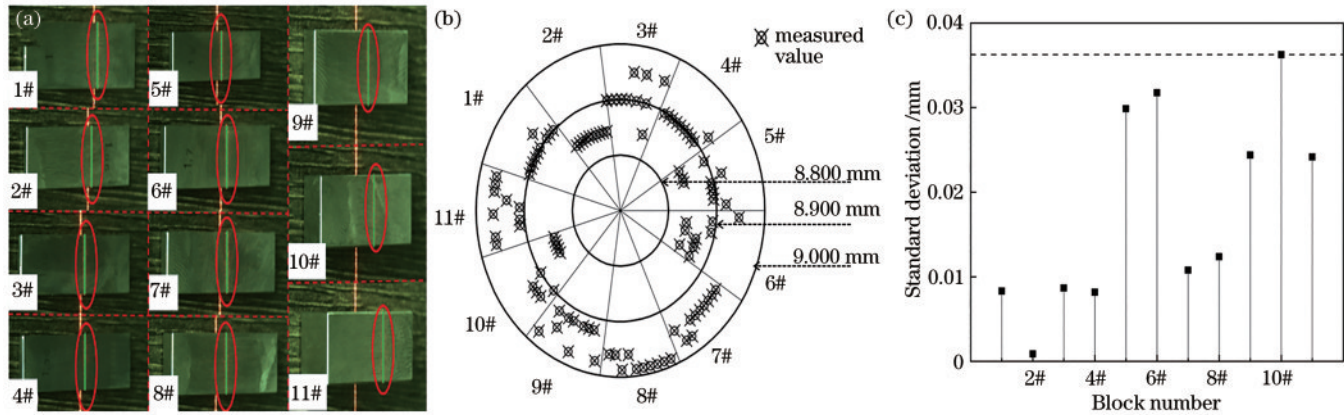


图10 不同量块宽度测量。(a)原始宽度;(b)宽度测量值;(c)宽度方向的重复测量误差标准差

Fig. 10 Width measurement of different gauge blocks. (a) Original widths; (b) width measurements; (c) standard deviations of repeated measurement error in width

表4 11种量块的实际厚度值

Table 4 Actual thickness value of eleven gauge blocks

| Block number | 1# | 2# | 3# | 4# | 5# | 6# | 7# | 8# | 9# | 10# | 11# |
|----------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|
| Actual thickness value /mm | 1.000 | 1.060 | 1.100 | 1.300 | 1.500 | 1.700 | 2.000 | 3.000 | 4.000 | 6.000 | 10.000 |

表5 量块最大测量误差比较

Table 5 Comparison of maximum measurement error of gauge blocks

| Block number | True value /mm | | Result of proposed method /mm | | Result of multi-line fitting method /mm | |
|--------------|----------------|--------|-------------------------------|--------|---|--------|
| | Width | Height | Width | Height | Width | Height |
| 1# | 8.900 | 1.000 | 8.928 | 1.015 | 8.975 | 1.086 |
| 2# | 8.900 | 1.060 | 8.847 | 1.008 | 8.883 | 1.158 |
| 3# | 8.900 | 1.100 | 8.954 | 1.141 | 8.974 | 1.171 |
| 4# | 8.900 | 1.300 | 8.925 | 1.268 | 8.819 | 1.389 |
| 5# | 8.900 | 1.500 | 8.841 | 1.531 | 8.970 | 1.586 |
| 6# | 8.900 | 1.700 | 8.838 | 1.735 | 8.813 | 1.792 |
| 7# | 8.900 | 2.000 | 8.971 | 1.971 | 8.963 | 2.094 |
| 8# | 8.900 | 3.000 | 8.988 | 2.976 | 8.950 | 3.095 |
| 9# | 8.900 | 4.000 | 8.976 | 3.937 | 8.985 | 4.080 |
| 10# | 8.900 | 6.000 | 8.847 | 5.947 | 8.997 | 6.084 |
| 11# | 8.900 | 10.000 | 8.963 | 9.941 | 8.801 | 10.068 |

方向测量还是宽度方向测量,所采用方法的最大测量误差均小于基于多结构光线条直线方程方法(除量块

7#和量块8#的宽度方向测量之外)。同时,所采用方法在高度方向和宽度方向的最大测量误差分别为

0.081 mm 和 -0.088 mm, 均小于 0.1 mm, 表明该方法能够满足实际生产要求, 可以用于异型微小构件几何尺寸的测量。

4.2 异型微小构件几何尺寸测量试验

基于 Microsoft Foundation Classes 和 OpenCV 编制异型微小构件几何尺寸测量程序, 完成对 3 种异型微小构件几何尺寸的测量与精度分析。

首先, 通过已经完成标定的测量系统, 对带有线结构光条纹的 3 种不同规格异型微小构件进行拍摄, 如图 11(a)、12(a)、13(a) 所示, 3 种构件各段真实尺寸都通过螺旋测微器测得。接着, 对获得的图像进行 Steger 细化处理, 提取不同型号异型微小构件的几何端点像素坐标, 几何端点选取如图 11(b)、12(b)、13(b) 所示。然后, 通过式(10)将各个端点的像素坐标转换到相机坐标系下, 再计算构件各段之间的距离, 构件各段尺寸测量值如图 11(c)、12(c)、13(c) 所示。最后, 对同一型号的异型微小构件进行 10 次测量, 并对每个测量值进行误差分析, 测量误差如图 11(d)、12(d)、13(d) 所示。

一号构件各段距离测量值都很接近真实值, 如图 11(c) 所示, 图中 A_1 、 B_1 、 C_1 分别代表点 1→2、点 2→3、点 3→4 之间的距离, 各段距离由螺旋测微器测量得到的真实值分别为 2.920 mm、0.745 mm、3.990 mm。对比各段距离的测量误差可以发现, 高度方向的最大测量误差为 B_1 的第 4 次测量误差 (0.065 mm), 且 B_1 的最后 5 次测量误差变化较为明显, 这可能是由测量过程中放置相机的框架振动而引起的。宽度方向的最大测量误差为 C_1 的第 10 次测量误差 (-0.069 mm), 但宽度方向的整体测量误差变化较小, 说明宽度方向测

量的可重复性较好。

二号构件各段距离测量值如图 12(c) 所示, 其中 A_2 、 B_2 、 C_2 、 D_2 、 E_2 、 F_2 分别代表点 1→2、点 2→3、点 3→4、点 4→5、点 5→6、点 1→6 之间的距离, 各段距离由螺旋测微器测量得到的真实值分别为 1.240 mm、0.540 mm、1.452 mm、0.290 mm、2.700 mm、5.392 mm。高度方向的 B_2 、 D_2 的整体测量误差较大, B_2 的第 3 次和第 4 次测量误差最大 (0.078 mm), 这可能是光照不均匀以及金属凹槽的光泽反射, 造成点 3 和点 4 像素坐标偏差较大引起的。 E_2 的前 3 次测量误差最大, 为 0.060 mm, 但宽度方向的整体测量结果较为稳定, 误差变化较小。

三号构件各段距离测量值如图 13(c) 所示, 其中 A_3 、 B_3 、 C_3 、 D_3 、 E_3 、 F_3 分别代表点 1→2、点 2→3、点 3→4、点 4→5、点 5→6、点 1→6 之间的距离, 各段距离由螺旋测微器测量得到的真实值分别为 2.400 mm、1.329 mm、5.210 mm、1.329 mm、2.400 mm、10.010 mm。对比各段距离的重复测量值, 可以发现宽度方向的最大误差为 0.072 mm, E_3 的前 4 次测量误差都比较大, 这可能是异型构件放置的位置靠边缘以及线结构光条纹不稳定引起的。高度方向的 B_3 和 D_3 的最大测量误差为 -0.059 mm, 高度方向的测量结果都较为稳定。

由上述结果可知, 针对 3 种异型构件进行 10 次重复性测量, 在高度方向和宽度方向的最大测量误差分别为 0.078 mm 和 0.072 mm, 整体测量误差都小于 0.1 mm, 表明该方法可以用于实际生产过程中异型微小构件几何尺寸的检测。

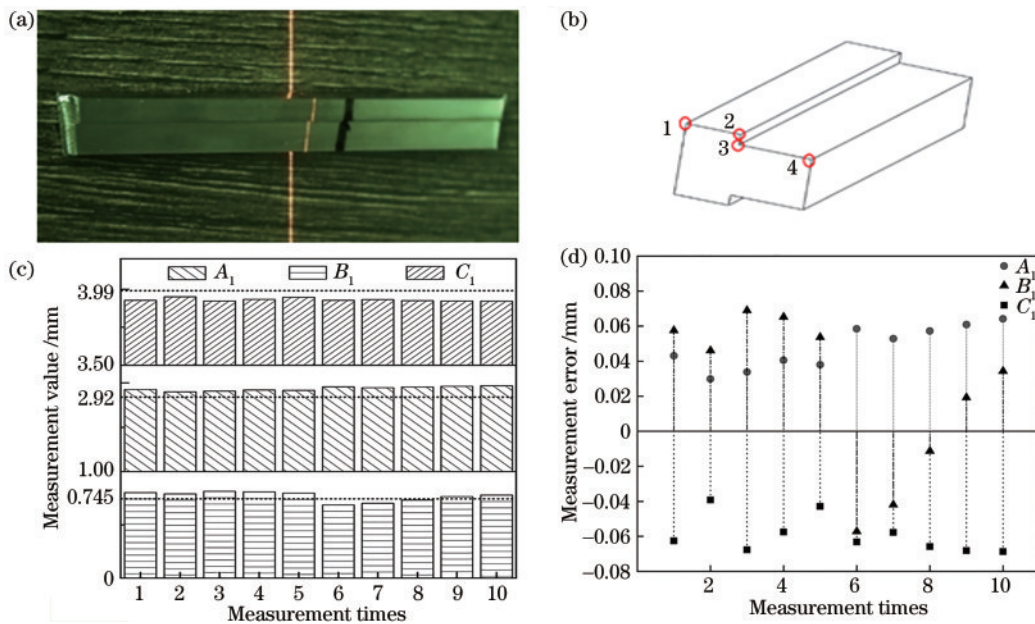


图 11 一号异型微小构件测量试验。(a) 构件原图; (b) 几何端点位置; (c) 构件各段尺寸测量; (d) 构件几何尺寸误差
Fig. 11 Measurement test of No. 1 micro irregular component. (a) Original image of the component; (b) position of geometric points; (c) dimension measurement of different parts of the component; (d) geometric dimension error of the component

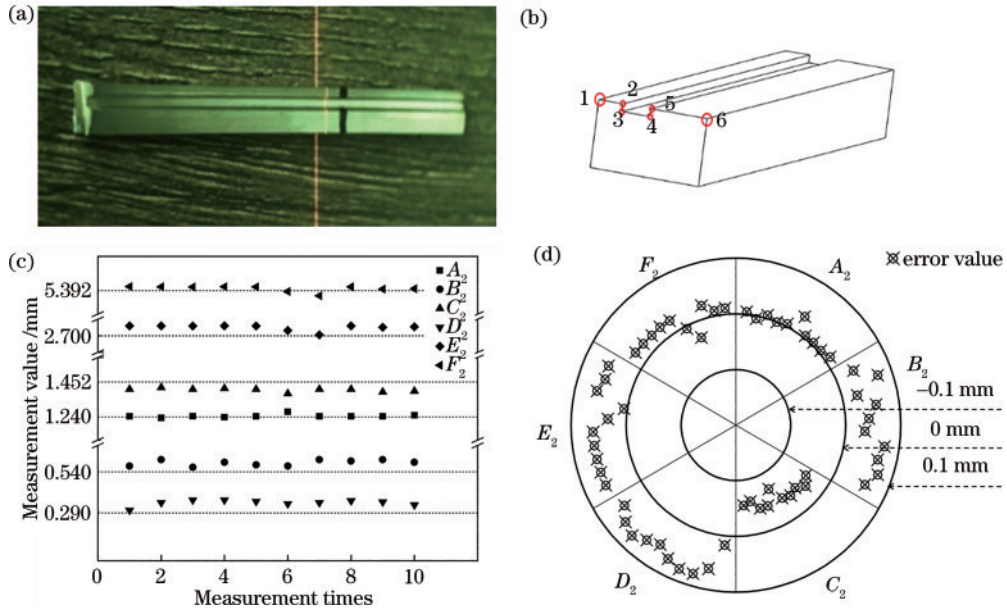


图 12 二号异型微小构件测量试验。(a) 构件原图; (b) 几何端点位置; (c) 构件各段尺寸测量; (d) 构件几何尺寸误差
 Fig. 12 Measurement test of No. 2 micro irregular component. (a) Original image of the component; (b) position image of geometric points; (c) dimension measurement of different parts of the component; (d) geometric dimension error of the component

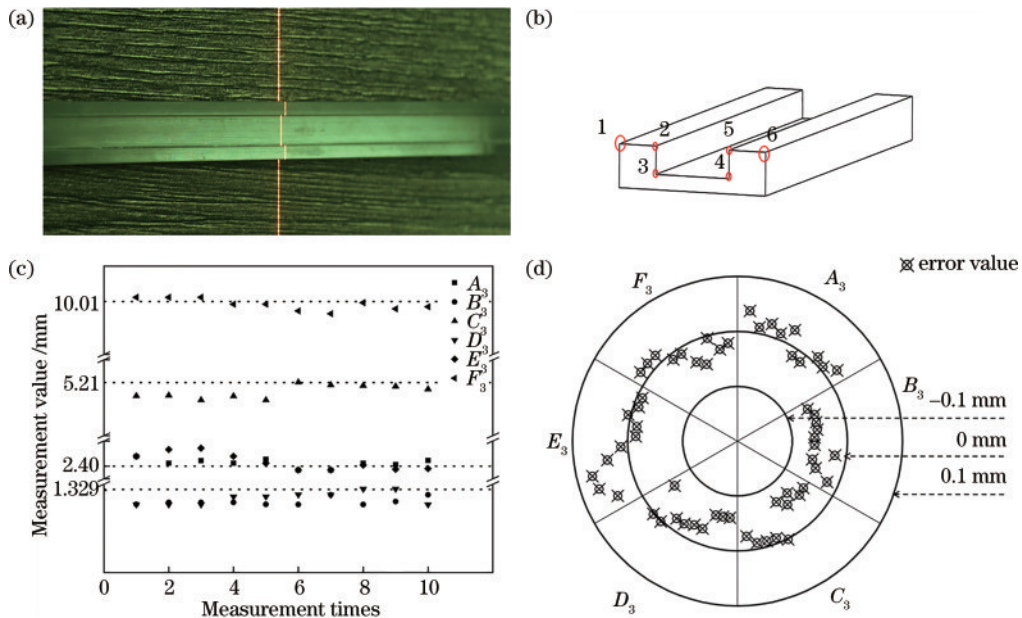


图 13 三号异型微小构件测量试验。(a) 构件原图; (b) 几何端点位置; (c) 构件各段尺寸测量; (d) 构件几何尺寸误差
 Fig. 13 Measurement test of No. 3 micro irregular component. (a) Original image of the component; (b) position image of geometric points; (c) dimension measurement of different parts of the component; (d) geometric dimension error of the component

5 结 论

针对当前异型微小构件几何尺寸测量方法存在劳动强度大、生产效率低、测量精度不稳定等问题,提出一种利用线结构光的非接触式测量方法,实现了对异型微小构件几何尺寸的精准测量。该方法中,工业相机的标定精度为 0.07348 pixel,线结构光平面的拟合 RMS 误差为 0.067 mm,标准量块高度方向与宽度方

向的最大测量误差分别为 0.081 mm 和 -0.088 mm,最大重复测量误差标准差分别为 0.036 mm 和 0.030 mm。对 3 种不同规格的异型微小构件进行测量试验,其中高度方向和宽度方向的最大测量误差分别为 0.078 mm 和 0.072 mm。结果表明该测量系统的测量误差均小于 0.1 mm,且其可重复性较好,能够满足实际工业生产中的测量精度要求,同时为异型微小构件几何尺寸精准测量提供一种新方法。

参 考 文 献

- [1] 王维, 王杰, 黄易杨, 等. 基于偏振透射结构光的透明物体表面缺陷检测方法[J]. 光学学报, 2021, 41(18): 1812002.
Wang W, Wang J, Huang Y Y, et al. Surface defect detection in transparent objects using polarized transmission structured light[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(18): 1812002.
- [2] 韩家杰, 周建平, 薛瑞雷, 等. 线结构光管道焊缝表面形貌重建与质量评估[J]. 中国激光, 2021, 48(14): 1402010.
Han J J, Zhou J P, Xue R L, et al. Surface morphology reconstruction and quality evaluation of pipeline weld based on line structured light[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(14): 1402010.
- [3] Wang Z X, Fu Y J, Zhong K J, et al. A direct calibration method for line structured light measurement system based on parallel lines[J]. Optics Communications, 2022, 508: 127699.
- [4] Xu X B, Fei Z W, Yang J, et al. Line structured light calibration method and centerline extraction: a review[J]. Results in Physics, 2020, 19: 103637.
- [5] 杨金祥, 章海, 陈胜. 基于线结构光传感器的汽车后横梁前板尺寸测量[J]. 机械工程师, 2021(11): 84-86.
Yang J X, Zhang H, Chen S. Front plate dimension measurement of automobile rear cross beam based on line structured light sensor[J]. Mechanical Engineer, 2021(11): 84-86.
- [6] 王乐, 王昊, 王凡, 等. 轮廓测量系统激光不共面误差修正方法[J]. 中国激光, 2022, 49(6): 0604002.
Wang L, Wang H, Wang F, et al. Correction method for laser noncoplanar error for rail profile measurement system[J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(6): 0604002.
- [7] 王华, 吴东旭, 张爽, 等. 基于误差补偿的立体视觉系统标定方法[J]. 应用激光, 2021, 41(5): 1119-1125.
Wang H, Wu D X, Zhang S, et al. Calibration method of stereo vision system based on error compensation[J]. Applied Laser, 2021, 41(5): 1119-1125.
- [8] 程锦, 何平安, 吴凌杰. 基于三线结构光的大型圆柱工件直径测量系统[J]. 光学与光电技术, 2021, 19(4): 30-36.
Cheng J, He P A, Wu L J. Diameter measurement system of large cylindrical workpiece based on three-line structured light[J]. Optics & Optoelectronic Technology, 2021, 19(4): 30-36.
- [9] 张翠翠, 刘思远, 赵京鹤. 基于线结构光视觉的轴径主动测量方法[J]. 机床与液压, 2021, 49(17): 132-136.
Zhang C C, Liu S Y, Zhao J H. An active diameter measurement method based on linear structured light vision[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2021, 49(17): 132-136.
- [10] 王乐, 周谦, 方玥, 等. 基于线结构光的钢轨扣件紧固状态检测方法[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(16): 1612002.
Wang L, Zhou Q, Fang Y, et al. Detection method of rail fastener fastening state based on line structured light[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(16): 1612002.
- [11] 陈东旭, 赵铁军, 乔赫廷. 基于线结构光的焊缝位姿识别研究[J]. 机械工程与自动化, 2021(4): 38-40, 43.
Chen D X, Zhao T J, Qiao H T. Research on weld position-posture recognition based on line structured light[J]. Mechanical Engineering & Automation, 2021(4): 38-40, 43.
- [12] 张旭, 周涛. 平顶线结构光的中心检测算法及光刀平面标定[J]. 光子学报, 2017, 46(5): 0512001.
Zhang X, Zhou T. Center detection algorithm and knife plane calibration of flat top line structured light[J]. Acta Photonica Sinica, 2017, 46(5): 0512001.
- [13] 李志宇, 林嘉睿, 孙岩标, 等. 一种基于线结构光传感器的圆位姿测量方法[J]. 光学学报, 2020, 40(15): 1512004.
Li Z Y, Lin J R, Sun Y B, et al. A method for measuring circular pose based on line structured light sensor[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(15): 1512004.
- [14] Guo X Z, Shi Z Y, Yu B, et al. 3D measurement of gears based on a line structured light sensor[J]. Precision Engineering, 2020, 61: 160-169.
- [15] Shang Z Y, Wang J H, Zhao L, et al. Measurement of gear tooth profiles using incoherent line structured light[J]. Measurement, 2022, 189: 110450.
- [16] Wang Z X, Fu Y J, Zhong K J, et al. A direct calibration method for line structured light measurement system based on parallel lines[J]. Optics Communications, 2022, 508: 127699.
- [17] Zhang Z. A flexible new technique for camera calibration[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2000, 22(11): 1330-1334.
- [18] 余扬. 基于二维 Otsu 的舰船目标图像分割方法[J]. 舰船电子工程, 2022, 42(1): 36-39.
Yu Y. Image segmentation based on two-dimensional otsu algorithm[J]. Ship Electronic Engineering, 2022, 42(1): 36-39.
- [19] 于龙龙, 李艳文, 栾英宝, 等. 基于二维平面靶标的线结构光标定[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(6): 124-131.
Yu L L, Li Y W, Luan Y B, et al. Line structured light calibrating based on two-dimensional planar target[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(6): 124-131.