

# 基于平行线拟合的轴类零件几何尺寸视觉测量

李文杰<sup>1</sup>, 王海旺<sup>1</sup>, 李团兴<sup>1</sup>, 张宗辉<sup>1</sup>, 邓仕超<sup>1</sup>, 檀正东<sup>2</sup>, 高兴宇<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>桂林电子科技大学机电工程学院广西制造系统与先进制造技术重点实验室, 广西 桂林 541004;

<sup>2</sup>深圳市艾贝特电子科技有限公司, 广东 深圳 518000

**摘要** 在视觉测量中,为提高轴类零件尺寸测量的鲁棒性,基于平行线拟合提出了一种快速高精度的轴类零件几何尺寸视觉测量方法。平行性约束提高了该方法的抗噪能力,增强了工业测量装置对环境的适应性。首先基于模板匹配,快速找到了感兴趣区域(ROI)。然后根据Ransac算法,利用被测对象两边缘直线各自内点建立平行线方程组,并基于最小二乘法进行非线性优化,从而获取被测对象所占的像素数。在与传统算法进行对比的仿真实验中验证了所提方法的抗噪能力。最后,搭建了远心测量平台,对阶梯轴轴颈的几何尺寸进行测量,验证了所提方法的有效性与可行性。

**关键词** 机器视觉; 平行线拟合; 远心测量

中图分类号 TP391

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP202259.1015013

## Parallel Line Fitting Based Size Measurement for Shaft Parts in Visual Measurement

Li Wenjie<sup>1</sup>, Wang Haiwang<sup>1</sup>, Li Tuanxing<sup>1</sup>, Zhang Zonghui<sup>1</sup>, Deng Shichao<sup>1</sup>,  
Tan Zhengdong<sup>2</sup>, Gao Xingyu<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Guangxi Key Laboratory of Manufacturing Systems and Advanced Manufacturing Technology, School of Mechanical and Electrical Engineering, Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, Guangxi, China;

<sup>2</sup>Shenzhen Anewbest Electronic Technology Co., Ltd., Shenzhen 518000, Guangdong, China

**Abstract** To enhance the robustness of size estimation for shaft parts in visual measurements, this paper proposes a fast and high-precision vision measurement method for shaft part geometric dimensions based on parallel line fitting. Parallel constraint improves the noise resistance of the proposed method and enhances the adaptability of the industrial measuring device to its environment. First, a region of interest (ROI) was quickly found based on template matching. Then, a parallel line equation was established using the Ransac algorithm for the interior points of the two edge lines of a measured object. Additionally, a nonlinear optimization was performed based on the least square method to obtain the number of pixels occupied by the measured object. In the simulation, the anti-noise performance of the proposed method was verified by comparing it with traditional algorithms. Finally, a telecentric measuring platform was built to measure the shaft neck size for a stepped shaft. The results showed the effectiveness and feasibility of the proposed method.

**Key words** machine vision; parallel line fitting; telecentric measurement

收稿日期: 2021-07-23; 修回日期: 2021-09-08; 录用日期: 2021-09-23

基金项目: 广西科技基地人才专项(2018AD19077)、广西创新驱动发展专项基金(桂科AA18118002-3)、广西自然科学基金(2018JJA170110)

通信作者: \*gxy1981@guet.edu.com

## 1 引言

随着现代制造工业的快速发展,传统方法对工件几何尺寸的测量已无法满足要求。机器视觉技术具有快速、高精度、非接触等优点,在工业精密测量领域备受关注。文献[1]中详细介绍了机器视觉测量的工作原理,文献[2-5]中使用机器视觉解决了本领域复杂的测量问题。邹华东等<sup>[6]</sup>基于机器视觉克服了线纹尺补偿时人工采点造成的瞄准误差和摆正误差,有效提高了工作台定位精度。李晋惠等<sup>[7]</sup>基于双远心光学系统,实现了对螺纹特征点的提取与测量。支珊等<sup>[8]</sup>利用双阈值法提取齿轮的边缘信息,然后根据齿轮渐开线的几何关系得到齿廓边缘渐开线初始相位角,最后利用两条相邻同名齿廓初始相位角计算齿距,并提出了一种基于齿廓图像边缘过渡带信息统计的单个齿距算法。文献[9]使用激光光源和摄像机组成的结构光系统测量轴径,通过建立投影方程与理论像面方程得到轴径测量模型,最后利用标定求出测量精度。

在基于机器视觉的几何尺寸测量中,对待测量区域几何特征的检测拟合是非常关键的一步。孟德欣等<sup>[10]</sup>针对汽车零件中圆检测的实际需求,在基于Hough算法的基础上对其进行改进,实现了圆心与半径的快速检测。杨建西等<sup>[11]</sup>按几何特征对零件几何边缘进行分段,利用迭代拟合零件轮廓的方法有效抑制了噪声点对边缘拟合的干扰。刘今越等<sup>[12]</sup>采用整体拟合刀具边缘的方法,提高了刀具测量的精度。冯绍权等<sup>[13]</sup>采用补偿最小二乘的方法对空间直线进行拟合,提高了空间直线的拟合精度。

目前,对于轴类零件的直径测量方法基本都是先框选出第一条轴颈直线的数据点区域,然后拟合出边缘直线,再框选出第二条轴颈直线的数据点区域,求取此区域数据点到拟合直线的垂直距离平均值,来作为轴类零件直径的测量值,因为无法剔除噪声点,导致测量精度降低。为解决此问题,本文提出了一种基于平行线拟合的轴类零件几何尺寸测量方法。

## 2 图像边缘提取

### 2.1 模板匹配

对汽车轴的直径尺寸进行测量,如图1(a)虚线框部分所示。此图为双远心成像系统拍摄,因为双

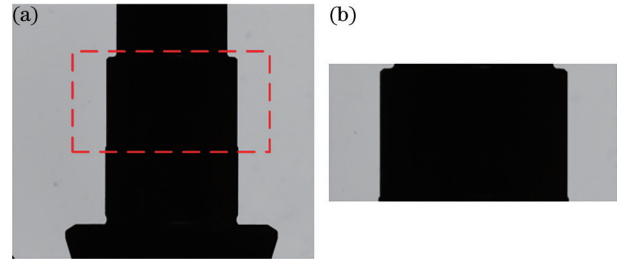


图1 模板匹配图。(a)待匹配目标图像;(b)模板图像  
Fig. 1 Template matching graph. (a) Target image to be matched; (b) template image

远心成像具有放大倍率基本恒定、大景深、“零”畸变等优点,所以常常用来进行零件的几何尺寸测量,但是由于视场小,所以只能拍摄含有连杆轴颈的部分图像,无法完整拍摄整个曲轴。建立测量轴段的模板图像,如图1(b)所示,使之与图1(a)进行模板匹配,快速检索到待测量区域。

采用归一化相关匹配法,匹配过程如图2所示。匹配结果 $R$ 的值越大,说明相关性越大,表达式为

$$R(x, y) = \frac{\sum_{x'y'} [T(x', y') \cdot I(x + x', y + y')]}{\sqrt{\sum_{x'y'} T(x', y')^2} \cdot \sqrt{\sum_{x'y'} I(x + x', y + y')^2}}, \quad (1)$$

式中: $R$ 为匹配计算结果; $T$ 表示模板图像; $I$ 表示待匹配图像; $x', y'$ 为距离模板图像原点的距离; $x, y$ 为距离待匹配目标图像原点的距离。

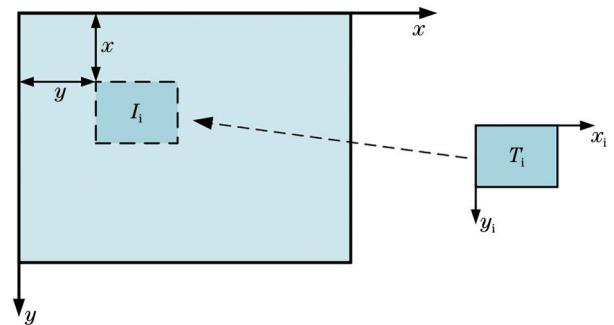


图2 匹配原理示意图  
Fig. 2 Schematic of matching principle

### 2.2 亚像素边缘提取

对模板匹配后的待检测区域图像进行亚像素边缘检测,获取亚像素边缘坐标。Canny算法可获取图像的像素级边缘,在此基础上,计算像素级边缘坐标梯度方向上相邻三点的梯度模值的二次差补值作为新的边缘坐标,即亚像素边缘。亚像素边缘的求取如图3所示,Canny算法会选择模值最大

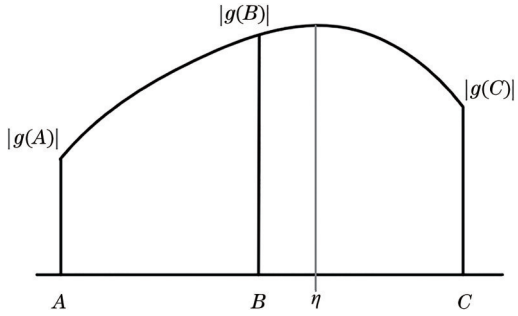


图 3 亚像素边缘点示意图

Fig. 3 Schematic diagram of sub pixel edge points

的 B 点作为边缘点,但在 B 点与 C 点中间可能会存在亚像素级的  $\eta$  点,  $\eta$  点的梯度模值大于 AC 之间的任何点,所以  $\eta$  点能更好地代表边缘。图 4(a)为像

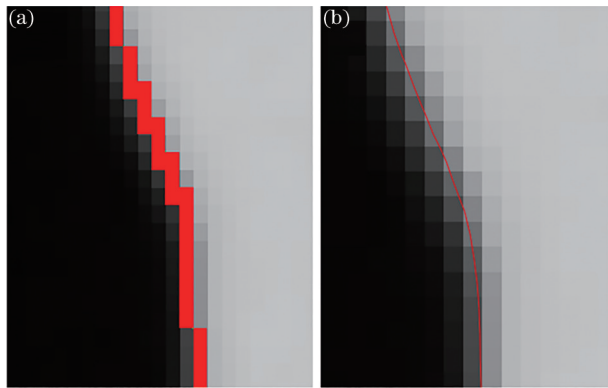


图 4 像素边缘与亚像素边缘。(a)像素边缘;(b)亚像素边缘  
Fig. 4 Pixel edge and subpixel edge. (a) Pixel edge;  
(b) subpixel edge

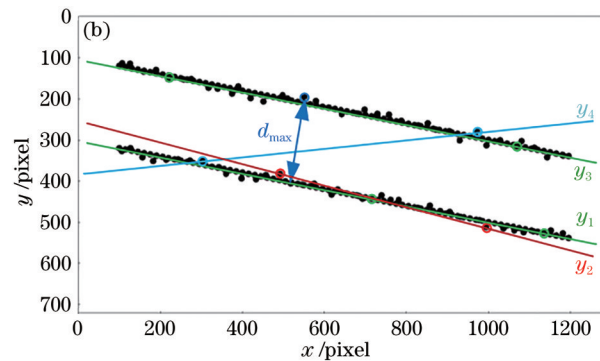
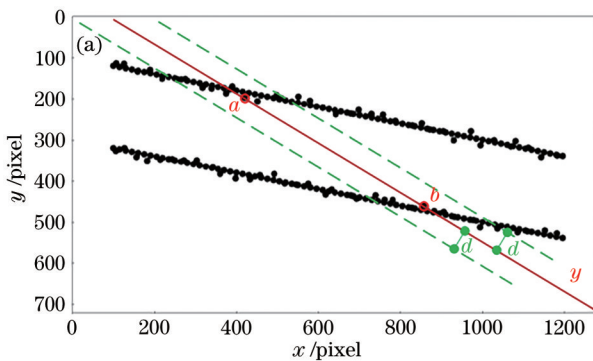


图 5 Ransac 算法选取各条直线数据点示意。(a)内点求取;(b)阈值求取

Fig. 5 Data points of each line selected by Ransac algorithm. (a) Interior point calculation; (b) threshold value calculation

### 3.2 最小二乘法拟合平行线

利用 3.1 节找到的两直线各数据点构造平行线:

$$\begin{cases} y_1 = wx_1 + b_1 \\ y_2 = wx_2 + b_2 \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $y_1, x_1$  为第一条直线的数据点;  $y_2, x_2$  为第二条

素边缘,图 4(b)为亚像素边缘。  $\eta$  点的求取表达式为

$$\eta = \frac{1}{2} \frac{|g(A)| - |g(C)|}{|g(A)| + |g(C)| - 2|g(B)|} \quad (2)$$

式中:  $|g(A, B, C)|$  为三个垂直于边缘方向上的像素级位置的梯度模值。

## 3 平行线拟合

### 3.1 Ransac 算法选取直线数据点

假设图 5 中的各点为亚像素边缘点。如图 5(a)所示,首先随机选取两点  $a, b$ ,过这两点作直线  $y$ ,设置阈值  $d$  (此阈值可根据像素边缘精度的实际情况进行选取,一般可选 0~2 区间内),求所有点到直线  $y$  的垂直距离,垂直距离小于阈值  $d$  的点即为内点,并统计内点的个数。重复上述步骤,按内点的个数对直线进行排序,如图 5(b),假设直线内点个数  $y_1 > y_2 > y_3 > y_4$ ,  $y_1$  的内点即为第一条直线的数据点,求两直线的距离阈值  $d'$ ,先求所有点到直线  $y_1$  的垂直距离,找到其最大值  $d_{max}$ ,令距离阈值  $d' = d_{max}/2$ 。

找第二条直线的数据点,依次求取直线  $y_2, y_3, y_4, \dots$  的任意一个内点到直线  $y_1$  的垂直距离  $d_2, d_3, d_4, \dots$ ,直到  $d_x$  大于阈值  $d'$ ,则此条直线的内点为第二条直线的数据点,即直线  $y_3$  的内点。至此,已经找到了两条直线各自的数据点。

直线的数据点;  $w$  为两直线的斜率;  $b_1, b_2$  分别为直线  $y_1, y_2$  的截距。根据式(3)构造残差函数:

$$L = \sum_{i=1}^{n_1} (wx_{1,i} + b_1 - y_{1,i})^2 + \sum_{j=1}^{n_2} (wx_{2,j} + b_2 - y_{2,j})^2 \quad (4)$$

式中： $n_1$ 、 $n_2$  分别为第一条直线与第二条直线数据点的个数。对  $w$  进行求导，结果为

$$\frac{\partial L}{\partial w} = \frac{\partial \sum_{i=1}^{n_1} (wx_{1,i} + b_1 - y_{1,i})^2}{\partial w} + \frac{\partial \sum_{j=1}^{n_2} (wx_{2,j} + b_2 - y_{2,j})^2}{\partial w}, \quad (5)$$

展开为

$$\frac{\partial L}{\partial w} = \sum_{i=1}^{n_1} 2(wx_{1,i} + b_1 - y_{1,i})x_{1,i} + \sum_{j=1}^{n_2} 2(wx_{2,j} + b_2 - y_{2,j})x_{2,j}, \quad (6)$$

令  $\sum_{i=1}^{n_1} x_{1,i} = n_1 \bar{x}_1$ ,  $\sum_{j=1}^{n_2} x_{2,j} = n_2 \bar{x}_2$ ,  $\sum_{i=1}^{n_1} y_{1,i} = n_1 \bar{y}_1$ ,  $\sum_{j=1}^{n_2} y_{2,j} = n_2 \bar{y}_2$ , 可得

$$\frac{\partial L}{\partial w} = 2 \left[ w \left( \sum_{i=1}^{n_1} x_{1,i}^2 - n_1 \bar{x}_1^2 + \sum_{j=1}^{n_2} x_{2,j}^2 - n_2 \bar{x}_2^2 \right) + n_1 \bar{x}_1 \bar{y}_1 - \sum_{i=1}^{n_1} x_{1,i} y_{1,i} + n_2 \bar{x}_2 \bar{y}_2 - \sum_{j=1}^{n_2} x_{2,j} y_{2,j} \right]. \quad (7)$$

令  $\frac{\partial L}{\partial w} = 0$ , 可得

$$w = \frac{\sum_{i=1}^{n_1} x_{1,i} y_{1,i} - n_1 \bar{x}_1 \bar{y}_1 + \sum_{j=1}^{n_2} x_{2,j} y_{2,j} - n_2 \bar{x}_2 \bar{y}_2}{\sum_{i=1}^{n_1} x_{1,i}^2 - n_1 \bar{x}_1^2 + \sum_{j=1}^{n_2} x_{2,j}^2 - n_2 \bar{x}_2^2}, \quad (8)$$

化简为

$$w = \frac{\sum_{i=1}^{n_1} (x_{1,i} - \bar{x}_1)(y_{1,i} - \bar{y}_1) + \sum_{j=1}^{n_2} (x_{2,j} - \bar{x}_2)(y_{2,j} - \bar{y}_2)}{\sum_{i=1}^{n_1} (x_{1,i} - \bar{x}_1)^2 + \sum_{j=1}^{n_2} (x_{2,j} - \bar{x}_2)^2}. \quad (9)$$

对  $b$  求导, 得

$$\frac{\partial L}{\partial b} = \frac{\partial \sum_{i=1}^{n_1} (wx_{1,i} + b_1 - y_{1,i})^2}{\partial b_1} + \frac{\partial \sum_{j=1}^{n_2} (wx_{2,j} + b_2 - y_{2,j})^2}{\partial b_2}, \quad (10)$$

化简为

$$\frac{\partial L}{\partial b} = 2n_1(wx_{1,i} + b_1 - \bar{y}_1) + 2n_2(wx_{2,j} + b_2 - \bar{y}_2). \quad (11)$$

令  $\frac{\partial L}{\partial b} = 0$ , 可得

$$w\bar{x}_1 + b_1 - \bar{y}_1 = 0, \quad (12)$$

$$w\bar{x}_2 + b_2 - \bar{y}_2 = 0, \quad (13)$$

则:

$$b_1 = \bar{y}_1 - w\bar{x}_1, \quad (14)$$

$$b_2 = \bar{y}_2 - w\bar{x}_2. \quad (15)$$

至此, 已经求出平行的斜率与截距, 故可求出平行线之间距离所占的像素数, 再根据相机标定的结果, 即可求出平行线的真实距离, 其平行线拟合结果如图 6 所示。

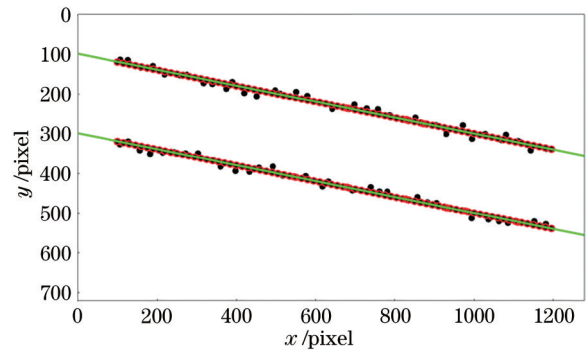


图 6 平行线拟合结果

Fig. 6 Parallel line fitting results

## 4 实验分析与讨论

### 4.1 仿真实验

为了验证所提方法的理论可行性, 仿真出间隔 50 个像素的两条直线数据点, 并重复 50 次, 并加入随机噪声点。图 7 为某两次仿真实验结果的示意图。而且对所提方法与传统方法进行了对比。传统方法得到的结果如图 8 所示。首先框选出第一条直线的数据点, 使用最小二乘法拟合出第一条直线  $Ax + By + C = 0$ , 然后框选出第二条直线的数据点, 求取第二条直线的数据点至第一条直线的距离平均值  $\bar{d}$ 。

$$\bar{d} = \sum_{i=1}^n \left| \frac{Ax_i + By_i + C}{\sqrt{A^2 + B^2}} \right| / n, \quad (16)$$

式中： $n$  为第二条直线的数据点个数； $x_i$ 、 $y_i$  为第二条直线数据点的纵横坐标。

分别使用两种方法计算两条直线的像素距离, 结果如图 9 所示, 前 6 次数据如表 1 所示。由仿真实验可得, 所提方法测量精度高, 受噪声影响小, 成功地筛选了大部分噪声点。

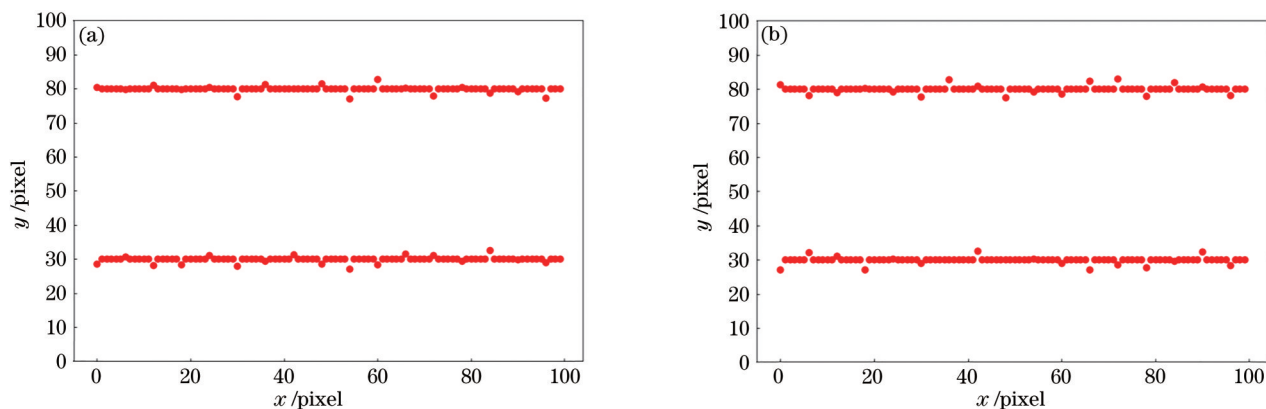


图 7 边缘仿真。(a)仿真实验结果一;(b)仿真实验结果二

Fig. 7 Edge simulation. (a) Simulation experiment result 1; (b) simulation experiment result 2

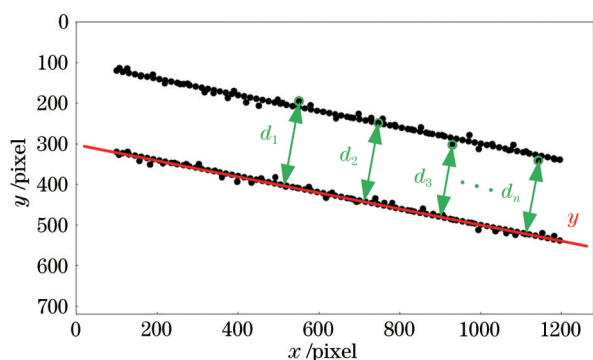


图 8 传统方法求两直线距离示意图

Fig. 8 Schematic of calculating the distance between two straight lines by traditional method

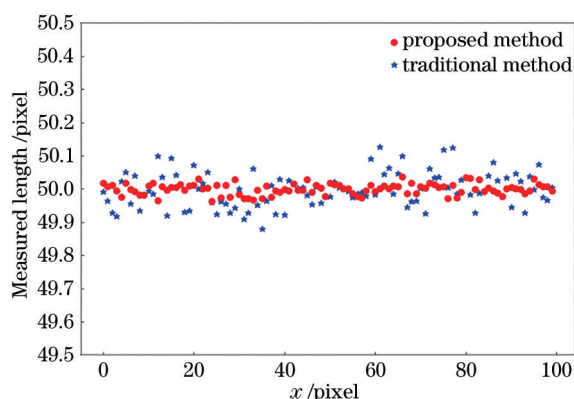


图 9 两种方法的测量距离比较

Fig. 9 Comparison of two methods for measuring distance

表 1 两种方法的部分测量数据

Table 1 Partial measurement data of two methods

Method	1	2	3	4	5	6	Mean value
Traditional method	49.993	49.964	49.93	49.918	50.025	50.051	0.052
Proposed method	50.017	50.006	50.012	49.994	49.976	50.017	0.015

#### 4.2 曲轴直径测量实验

为了验证所提方法的真实可行性,对阶梯轴的四段轴颈尺寸进行了测量实验,结果如图 10 所示,并与传统方法的测量值和鉴定的真实值进行了对比。实验装置如图 11 所示,主要由相机、远心镜头、

远心光源、轴及计算机组成,部分的型号参数如表 2 所示。实验过程中要保证环境光无明显变化,首先对远心系统进行标定,求出单个像素的实际距离,然后对零件进行拍摄,零件每旋转  $10^\circ$  对其拍摄一次,共拍摄 36 次,36 张零件图像的直径平均值即为

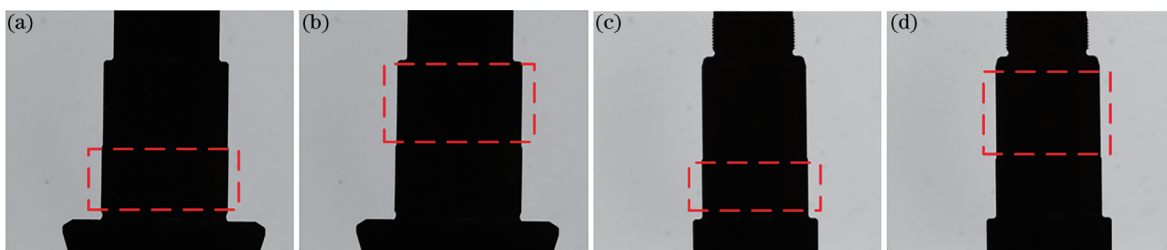


图 10 轴段图示。(a)轴段 a;(b)轴段 b;(c)轴段 c;(d)轴段 d

Fig. 10 Diagram of axle segments. (a) Axle segment a; (b) axle segment b; (c) axle segment c; (d) axle segment d

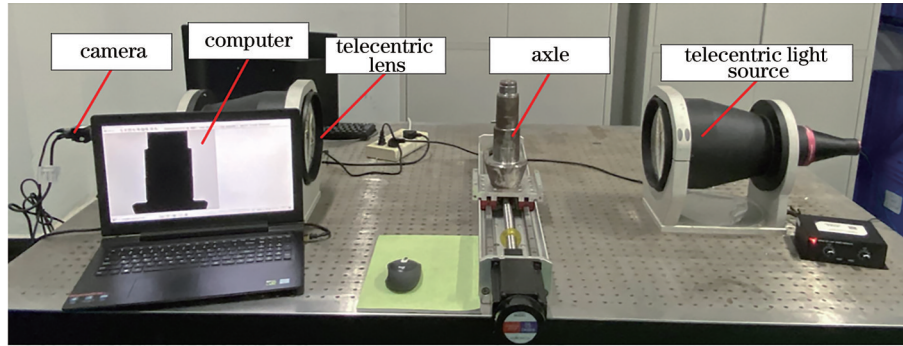


图 11 测量装置

Fig. 11 Measurement device

表 2 实验仪器参数

Table 2 Parameters of experimental devices

Device	Type	Parameter
Camera	MV-EM510C	Pixel number, size: 2456×2058, 3.45 μm
Telecentric lens	BT-23144	Magnification, DoF: 0.061, 90 mm
Telecentric light source	BT-TCL144	Beam diameter, working distance: 187 mm, 200–400 mm

所求,实验结果如表 3 所示,由实验结果可知,所提方法的测量误差在 6 μm 之内,传统方法的测量误差在 8 μm 之内,精度提高 25%。对此四段轴径进行

100 次测量,以验证重复精度,表 4 为部分测量数据,通过实验得出重复精度在 3 μm 之内,满足工业的需求。

表 3 实验测量结果

Table 3 Experimental measurement results

Parameter	Axle segment a	Axle segment b	Axle segment c	Axle segment d
Measuring time /s	1.345	1.289	1.356	1.338
Real dimension /mm	φ60.409	φ59.511	φ50.410	φ49.515
Dimension of traditional method /mm	φ60.401	φ59.518	φ50.416	φ49.509
Dimension error of traditional method /mm	0.008	0.007	0.006	0.006
Dimension of proposed method /mm	φ60.406	φ59.517	φ50.415	φ49.511
Dimension error of proposed method /mm	0.003	0.006	0.005	0.004

表 4 重复性实验结果

Table 4 Repetitive experiment results unit: mm

Experiment	Axle segment a	Axle segment b	Axle segment c	Axle segment d
Real dimension	φ60.409	φ59.511	φ50.410	φ49.515
Experiment 1	φ60.406	φ59.517	φ50.415	φ49.511
Experiment 2	φ60.408	φ59.515	φ50.414	φ49.509
Experiment 3	φ60.408	φ59.516	φ50.415	φ49.510
Experiment 4	φ60.405	φ59.515	φ50.416	φ49.511
Experiment 5	φ60.407	φ59.516	φ50.416	φ49.510
Experiment 6	φ60.409	φ59.517	φ50.414	φ49.512

## 5 结 论

所采取的对轴类零件几何尺寸进行测量的方法可自动检索零件两边缘各自数据点且筛除大部

分噪声;Ransac 方法在选取轴颈两直线各自数据点的过程中,对大部分噪声点进行了筛除,避免了噪声点对测量精度的影响。实验效果表明,所提方法具有很高的测量精度和测量效率,为轴类零件的几何尺寸测量提供了新的测量手段,对基于机器视觉的零件几何尺寸测量具有重要的意义。

## 参 考 文 献

- [1] Zhao Z, Wu D X, Zhang L. Research on measurement of mechanical parts based on vision[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2018, 394: 032083.
- [2] 孙凯传, 柳晨华, 姚光顺, 等. 联合最小软阈值二乘和 Haar-like 特征匹配的视觉跟踪[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(24): 241001.

- Sun K C, Liu C H, Yao G S, et al. Visual tracking combined least soft-threshold squares with Haar-like feature matching[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(24): 241001.
- [3] Ding Y Y, Zhang X B, Kovacevic R. A laser-based machine vision measurement system for laser forming [J]. *Measurement*, 2016, 82: 345-354.
- [4] Song L M, Sun S Y, Yang Y G, et al. A multi-view stereo measurement system based on a laser scanner for fine workpieces[J]. *Sensors*, 2019, 19(2): 381.
- [5] Chang L Y, He S P, Liu Q, et al. Quantifying muskmelon fruit attributes with A-TEP-based model and machine vision measurement[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2018, 17(6): 1369-1379.
- [6] 邹华东, 贾瑞清, 张畅. 基于机器视觉的影像测量仪工作台定位误差精密补偿方法[J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(9): 091203.
- Zou H D, Jia R Q, Zhang C. Precision compensation method for positioning error of working table of vision measuring machine based on machine vision [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(9): 091203.
- [7] 李晋惠, 于亚琳, 田军委. 基于双远心光学系统的高精度外螺纹测量方法研究[J]. *应用光学*, 2016, 37(2): 244-249.
- Li J H, Yu Y L, Tian J W. High-precision external screw measuring method based on double-telecentric optical system[J]. *Journal of Applied Optics*, 2016, 37(2): 244-249.
- [8] 支珊, 赵文珍, 赵文辉, 等. 基于齿轮局部图像的齿距机器视觉测量方法[J]. *仪器仪表学报*, 2018, 39(2): 225-231.
- Zhi S, Zhao W Z, Zhao W H, et al. Visual measurement method of pitch machine based on gear local image[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2018, 39(2): 225-231.
- [9] Tan Q C, Kou Y, Miao J W, et al. A model of diameter measurement based on the machine vision [J]. *Symmetry*, 2021, 13(2): 187.
- [10] 孟德欣, 谢二莲. 基于Hough变换的汽车零件中圆形检测的改进算法[J]. *计算机工程与应用*, 2015, 51(11): 172-174, 211.
- Meng D X, Xie E L. Improved algorithm of automobile components circle detection based on Hough transform[J]. *Computer Engineering and Applications*, 2015, 51(11): 172-174, 211.
- [11] 杨建西, 林海波. 面向机油泵零件关键尺寸的机器视觉测量[J]. *组合机床与自动化加工技术*, 2019(6): 54-57.
- Yang J X, Lin H B. Machine vision measurement of critical dimensions for oil pump parts[J]. *Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique*, 2019(6): 54-57.
- [12] 刘今越, 王晓帅, 李洋, 等. 基于视觉式刀具测量的刀刃轮廓整体拟合[J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(2): 021505.
- Liu J Y, Wang X S, Li Y, et al. Overall fitting of blade contour based on tool measurement using machine vision[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(2): 021505.
- [13] 冯绍权, 花向红, 陶武勇. 一种基于补偿最小二乘的空间直线拟合算法[J]. *测绘科学*, 2019, 44(2): 89-93.
- Feng S Q, Hua X H, Tao W Y. A spatial linear fitting algorithm based on compensation least squares [J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2019, 44(2): 89-93.