

文章编号 1004-924X(2016)增-0583-08

光滑金属曲面视觉测量特征光条自动提取

刘长英, 刘 洋, 郭继东, 褚馨泽, 杨大鹏*
(吉林大学 仪器科学与电气工程学院, 吉林 长春 130061)

摘要: 为了实现结构光视觉测量法对光滑金属曲面的测量, 需要对特征光条图像进行提取。论文以动车车轴轴径测量为例, 对测量中的特征光条感兴趣区域和特征光条的自动提取方法进行了分析和研究。首先, 根据车轴特征光条的成像特征设计了腐蚀模板; 接着, 通过形态学图像处理技术, 即腐蚀技术和形态学重建技术等得到特征光条图像的感兴趣区域; 然后, 在感兴趣区域内初步提取出光条基准线; 最后, 在基准线基础上求取各点法向量, 在各法向量方向上求取形心得到特征光条中心。实验结果表明: 本文方法可以快速、准确地确定特征光条感兴趣区域并提取特征光条, 根据所得特征光条中心所求得的轴径标准差小于 0.015 mm。完全满足动车组车轴视觉测量中特征光条提取的速度快、精度高、稳定性好及抗干扰能力强等要求。

关键词: 金属曲面; 机器视觉; 结构光; 特征光条; 感兴趣区域

中图分类号: TP394.1; TH691.9 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20162413.0583

Automatic extraction of characteristic light stripe in vision measurement of smooth metal surface

LIU Chang-ying, LIU Yang, GUO Ji-dong, CHU Xin-ze, Yang Da-peng*

(College of Instrumentation & Electrical Engineering,
Jilin University, Changchun 130061, Chian)

* Corresponding author, E-mail: ydp@jlu.edu.cn

Abstract: In order to achieve the measurement of smooth metal surface with the structure-light vision measurement method, it is required to extract image of the characteristic light stripe. In this paper, measurement for diameter of a motor car axle is taken as an example for analysis and research on Region-of-Interest (RoI) of the characteristic light stripe and the method for its automatic extraction. first, the corrosion template is designed in accordance with imaging features of the axle light stripe; second, the RoI of the characteristic light stripe image is obtained by means of the morphological image processing technique, namely the corrosion technique and morphological reconstruction technique, etc., and then the reference line of the light stripe is preliminarily extracted in the RoI; finally, the normal vector of each point is calculated based on the referenced line, and then the center of the characteristic light stripe is confirmed by working out the ball center in each normal vector. Experimental results indicate that RoI of the characteristic light stripe can be quickly and accurately confirmed, thus the characteristic light stripe can be extracted automatically. The standard deviation of the axle diame-

收稿日期: 2016-06-05; 修订日期: 2016-06-12.

基金项目: 吉林省科技发展计划资助项目 (No. 20150204053GX, No. 20160101286JC)

ter calculated based on center coordinate of the characteristic light stripe shall be less than 0.015 mm. The method completely satisfies the requirements for extraction of characteristic light stripe in the vision measurement of motor car axle, and such requirements include fast speed, high precision, good stability and strong anti-jamming capacity.

Key words: metal surface; machine vision; structure light; characteristic light stripe; area-of-interest

1 引言

高速动车组已经成为人们出行的一种重要交通工具,在现代交通中正起着重要的作用。在动车中有很多光滑的金属曲面零件,比如车轮和车轴。这些零件与动车的运行安全息息相关,都有极高的制作精度要求。因此,对动车中光滑的金属曲面零件的检测十分重要。现在,国内动车生产企业对动车的金属曲面零件检测还主要依靠游标卡尺、千分尺及靠尺等传统的检测工具,不仅检测效率低下,而且检测结果也易受测量工具精度、测量人员经验等因素影响,测量精度无法保证,已不能满足现代企业的实际生产要求^[1]。在国外,基于结构光的视觉测量技术已开始应用于车轴等的测量。该方法通过对激光投射器投射在车轴上的特征光条进行成像、处理和分析,以获得待测车轴的特征尺寸参数^[2-4]。由于特征光条是测量信息的载体,包含着测量目标的测量信息,所以特征光条的准确提取是实现测量的关键。由于测量现场背景复杂,故通常采用人工方法进行特征光条提取^[5]。极值法^[6]、曲线拟合法^[7]、重心法^[8]和高斯拟合法^[9]等是最常用的特征光条人工提取方法。这些方法易于实现,但光条提取精度不高。本文针对光滑金属曲面零件表面特征光条干扰严重的现象,提出了一种新的快速高精度特征光条自动提取技术,并以车轴尺寸测量为例对此方法进行介绍。

2 光滑金属表面特征光条成像特性

利用结构光测量方法进行测量时,理想的被测量面是漫反射面,即余弦辐射体,其反射光的光强分布可表示为:

$$I_{\theta} = I_N \cos \theta, \quad (1)$$

式中: I_N 为反射体表面法线方向的反光强度 I_{θ} 和

法线成 θ 角方向的反光强度。

这样只要当相机和激光器处于特定的位置关系时,相机都可以接收到理想的反射光图像,对于后期光条处理也较为方便^[10-11]。

但对于抛光的金属车轴表面而言,相机接收到的图像则复杂得多。由于金属车轴表面不是理想的漫反射体,其主要存在以下问题:

(1)光滑金属表面的镜面反射很强,另外相机与激光投射器之间又存在一定的夹角,故漫反射光和镜面反射光在金属表面上所成的像并不重合。

(2)具有一定镜面反射的金属表面可以对周围各种照明设备的光源进行成像。而对于在工厂中的检测系统,这些干扰是无法彻底消除的。

(3)相机主要依靠漫反射光来成像,在理想反射体上发生反射时漫反射光分布比较均匀,但是当被测物为较光亮的金属时,漫反射光的分布情况则会发生较大改变,镜面反射光附近分布较强,其它方向光强则很弱^[12]。

上述原因导致使用结构光法测量光滑金属表面时相机获取的特征光条图像十分复杂,如图 1 所示。因此,使用传统的特征光条提取方法无法有效地得到特征光条的中心。

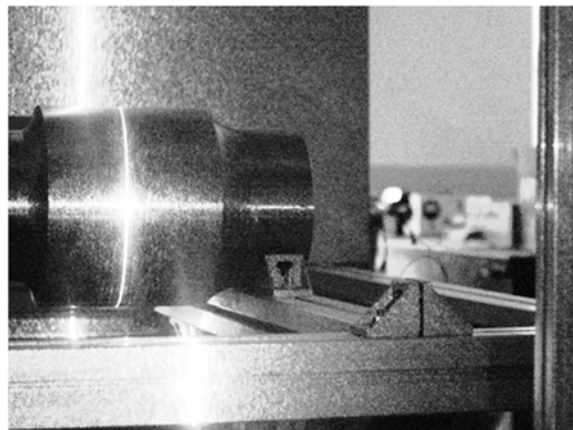


图 1 激光打在车轴上所成的像 I

Fig. 1 Image I of an axle illuminated by laser

3 特征区域的提取

在提取特征光条中心之前,需要先得到特征光条的特征区域,以简化后续提取难度,提高光条重心提取的准确度。

根据图 1 中特征光条的成像特点,即打在车轴表面上的光条是一个近似于十字交叉的图形,来区别于打在其它位置的光条,进而自动锁定待提取特征光条在图像中所在的区域。

可通过如下步骤对感兴趣特征区域进行提取:

第一步,设计腐蚀模板 se 。

第二步,将原图像 I 进行二值化操作的灰度阈值 t 设定为 1。

第三步,令 $t = t + 0.01$,对图像 I 进行二值化,操作得到二值化图像 I_b 。

第四步,对 I_b 进行以 se 为模板的腐蚀操作,得到腐蚀图像 I_c 。

第五步,以二值化图像 I_b 作为掩模图像,与腐蚀图像 I_c 一起进行形态学重建,得到新的腐蚀图像 I_{b2} 。

第六步,判断 I_{b2} 的连通域数量是否为 1,如果是则到第七步,如果不是则返回第三步。

第七步, I_{b2} 中唯一连通域所在区域就是所求的感兴趣区域。

寻找感兴趣区域的流程图如图 2 所示。

3.1 腐蚀模板的设计

根据测量系统所需特征光条的外形特性分析,建立一个如式(2)所示的十字形的二维二值模板:

$$se = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & \cdots & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & \cdots & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

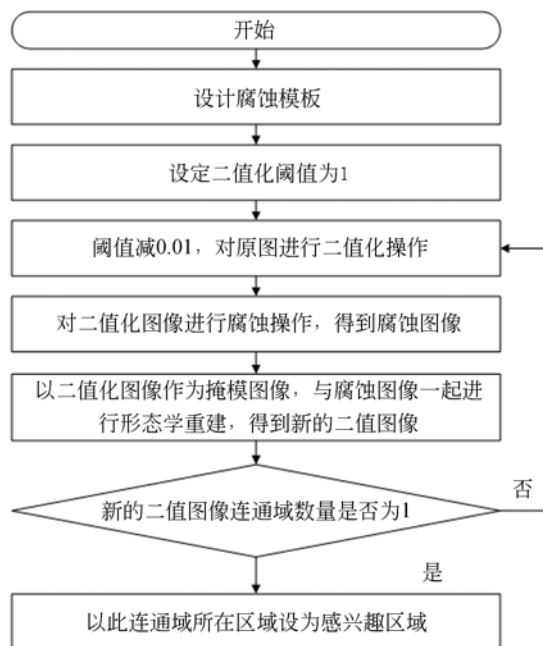


图 2 寻找感兴趣区域的流程
Fig. 2 Flow of finding region of interest(ROI)

测量系统的模板 se 是一个 $m \times n$ 的二维数组,通过图片描述时如图 3 所示。对于不同的工作环境,相机所拍摄的光条形态会有很大差别,所以根据不同的工作环境需要选择适当的模板,在本系统中选用了 400×70 的模板。



图 3 模板 se 的图像
Fig. 3 Image of template se

3.2 对光条图像的腐蚀运算

对获取的特征光条图像 I 做二值化操作,得到二值化的光条图像 I_b ,如图 4 所示。

使用模板 se 对原始图像的二值图 I_b 进行腐蚀运算,得到腐蚀图像 I_c ,该过程可通过数学公式描述为:

$$I_c = I_b \ominus se = \{p | se_p \subseteq I_b\}, \quad (3)$$

式中: I_b 是待腐蚀的二值图像; se 是腐蚀模板, 又称为结构元素, 通常是规则图像, 其有一个称为原点的参考点; p 表示 I_b 被 se 腐蚀后像素值仍然为 1 的点集。

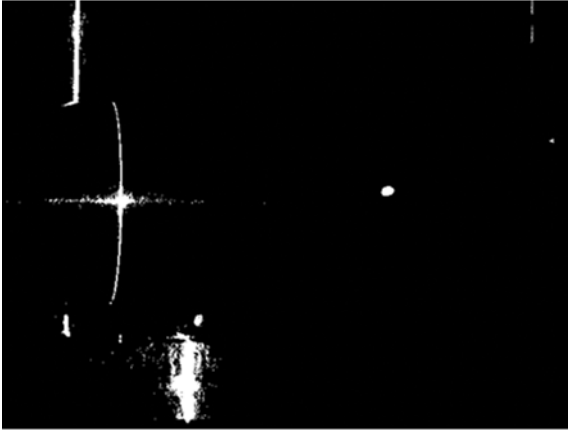


图 4 二值化的光条图像 I_b

Fig. 4 Threshold image I_b of light stripes

最后得到的腐蚀图像 I_c 如图 5 所示, 图像中的白点为特征光条所在区域内的模板 se 的原点。



图 5 腐蚀后得到的图像 I_c

Fig. 5 Images I_c after corrosion

3.3 光条腐蚀图像的形态学重建

通过形态学重建可以得到所需光条所在的连通域。

腐蚀操作会删除小的物体, 而膨胀操作则试图恢复遗留物体的形状。一幅二值图像 I_b 的 n 次重建开操作可定义为被 n 次腐蚀的图像 I_b 的膨胀重建, 即:

$$I_{b2} = O_R^n(I_b) = R_{I_b}^D[(I_b \ominus nse)], \quad (4)$$

其中: $I_b \ominus nse$ 表示 se 对 I_b 的 n 次腐蚀。在进行重建开操作时, 来自标记图像 F 对模板图像 G 的膨胀形态学重建表示为 $R_G^D(F) = D_G^{(b)}(F)$, 就是 F

关于 G 的测地膨胀, 这个过程反复迭代 k 次直至稳定状态。

将原始图像 I 按一定的阈值进行二值化, 将获得的二值化结果图像 I_b (如图 4 所示) 作为掩模图像。掩模图像和腐蚀图像 I_c 为维数相同的两个二值图像。在二值化的光条图像 I_b 下对腐蚀后得到的图像 I_c 进行形态学重建操作, 即找到符合模板 se 形状所在的连通域, 该连通域的范围即为所求的感兴趣区域, 如图 6 所示。

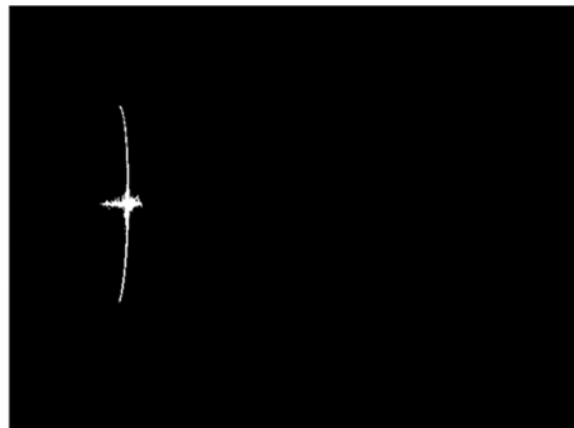


图 6 形态学重建后的图像 I_{b2}

Fig. 6 Image I_{b2} after morphological reconstruction

根据该连通域的点坐标可以获得结构光视觉测量的感兴趣区域。如图 7 所示。

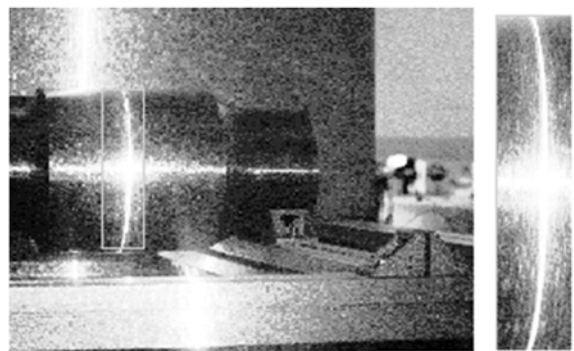


图 7 测轴光条感兴趣区域

Fig. 7 Region of interest for measured axle light stripe

4 特征光条的提取

观察感兴趣区域内的特征光条图像 (如图 7 所示) 选取合适的方法进行特征光条的提取。

对特征光条图像中非中间有噪声的一处进行截取,其灰度值如图 8 所示。由图 8 可知,光条边缘灰度值的斜率很大,而图像的中心处灰度值均为最大值 255,故可以将其当作一个阶跃函数,因此可以通过求形心来求取特征光条中心,这种方法不但运算速度快,而且准确率也高。

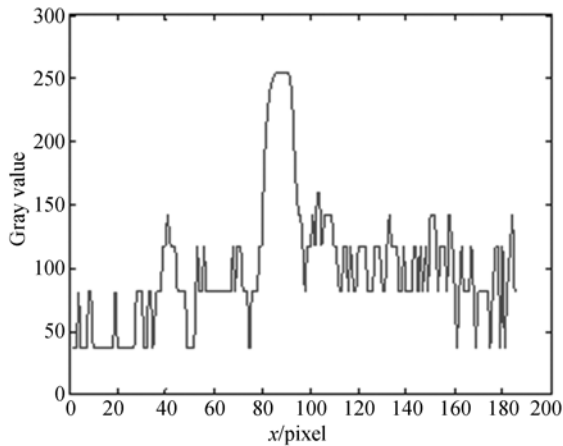


图 8 ROI 内第 200 行光条截面灰度值

Fig. 8 Gray values of the 200th line light stripe in ROI

采用按行求中心法和本文方法求得的结果对比,如图 9。针对特征光条的弧形形状特性,采用传统的按行计算形心的方法,结果会有偏差(如图 9 上方线所示),如果选用本文的方法(如图 9 下方线所示)所得中心更加准确。



图 9 按行求中心和本文方法求中心结果对比

Fig. 9 Comparison of center calculated by line and by proposed method

特征图像周围存在噪声干扰,因此对特征光条进行提取前首先需要对感兴趣区域内的特征光条图像做预处理。

由于特征光条两端的灰度值对比度高、噪声少,而中间对比度低、噪声大,如果直接使用大津阈值法进行二值化会使二值图出现畸形,难以用于特征光条中心的提取。

通过大津阈值法对图像进行二值化时,对每

个像素所使用的是同一个灰度阈值,不适于像特征光条图像这种不同点灰度值变化较大和噪声较多的情况。因此,针对特征光条图像这一特性,本文采用移动阈值法进行处理。使用移动阈值法处理时,原图像每行的二值图都由不同的阈值得出,这个阈值可由式(5)求出:

$$m(k) = 1 - \left[1 - \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{z_i}{255} \right) \right] / 2, \quad (5)$$

式中: $m(k)$ 是图像第 k 行的二值化阈值, n 是每行的像素个数, z_i 是这一行第 i 个像素的灰度值。通过移动阈值法得到的二值图与直接使用大津法求得的二值图相比有很大的改善,如图 10 所示。



图 10 大津法二值图(左)和移动阈值法二值图(右)

Fig. 10 Binary image of OTSU method (left) and binary image of moving threshold method (right)

从图 10 中依旧可以看到一些离散的噪声,这些噪声需要通过形态学进行处理。通过腐蚀掉小的独立的连通域,可以得到如图 11 的结果。



图 11 腐蚀掉噪声的二值图

Fig. 11 Binary image without noise

对图 11 进行光条中心提取。首先,提取图 11 中的条中心基准线。每行的光条基准线坐标如式(6):

$$r_i = \max(u_i)/2 + \frac{3}{2} \min(u_i), \quad (6)$$

其中: r_i 表示图 11 中第 i 行的光条基准线横坐标; u_i 表示图 11 中第 i 行逻辑值为 1 的所有像素的横坐标。

对式(6)中的基准线 r 进行滤波处理,使其平滑,以便进一步提取。对于基准线上的每个点,通过如下计算可得到对应的光条中心。

$$c_{iy} = cn_i \times (v_{ijx} - v_{ilx}) / (t-1) + v_{ilx}, \quad (7)$$

$$c_{ix} = cn_i \times (v_{ijy} - v_{ily}) / (t-1) + v_{ily}, \quad (8)$$

$$v_{ijx} = r_{i+1} - (t-1)/4 \times D_{xi} + (t-1) \times d_{xi}, \quad (9)$$

$$v_{ijy} = i + 1 - (t-1)/4 \times D_{yi} + (t-1) \times d_{yi}, \quad (10)$$

$$d_{xi} = 1 / \sqrt{1 + (r_{2;n-1} - r_{1;n-2})^2} + 1 / \sqrt{1 + (r_{3;n} - r_{2;n-1})^2}, \quad (11)$$

$$d_{yi} = -(r_{2;n-1} - r_{1;n-2}) / \sqrt{1 + (r_{2;n-1} - r_{1;n-2})^2} + (r_{3;n} - r_{2;n-1}) / \sqrt{1 + (r_{3;n} - r_{2;n-1})^2}, \quad (12)$$

式中: c_{ix}, c_{iy} 分别表示光条中心的横纵坐标。 v_{ijx}, v_{ijy} 分别表示基准线纵坐标 i 下法线方向上第 j 个像素的横纵坐标。 cn_i 表示在 v_{ijx}, v_{ijy} 坐标中像素灰度值最高点的位置。 d_{xi}, d_{yi} 分别表示基准线纵坐标 i 下法线 x, y 轴方向的单位向量值。式(12)中的 $r_{a;b}$ 表示 r 中第 a 个到第 b 个元素组成的一维矩阵。

图 12 为根据基准线所求的各点法线方向。

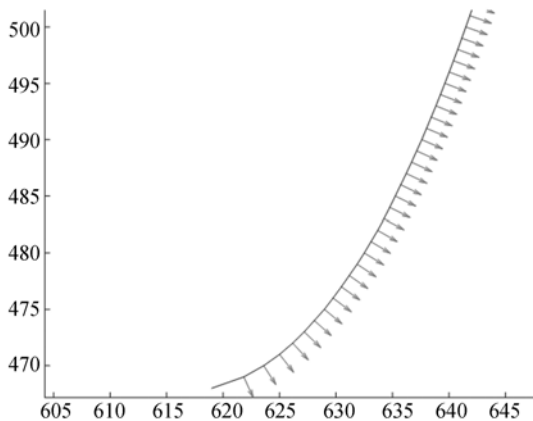


图 12 光条基准线的法向量

Fig. 12 Normal vectors of the reference line of light stripe

5 实验与分析

为了验证本文提出的特征光条提取方法的可行性和效果,按照文中所述方法,对真实的动车组的车轴特征光条进行了特征中心提取实验,并对测量结果进行了分析。

利用线结构光激光器 BLM9860 向车轴投射出红外平面光,平面结构光与车轴相交形成曲线特征光条,通过相机 SONY XCD-SX90 对特征图像进行采集,实验系统如图 13 所示。

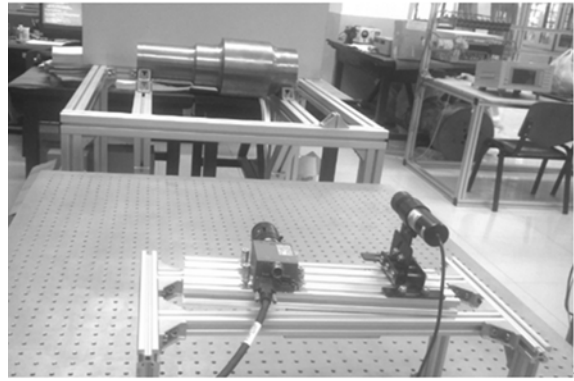


图 13 车轴轴径结构光视觉测量系统

Fig. 13 Structured light vision measurement system for axle shaft diameter

由图 1 所示的像机获得的原始特征图像可知,图像中含有大量非测量特征光条所需信息,噪声干扰严重,而且车轴特征光条中心具有明显的干扰信息。

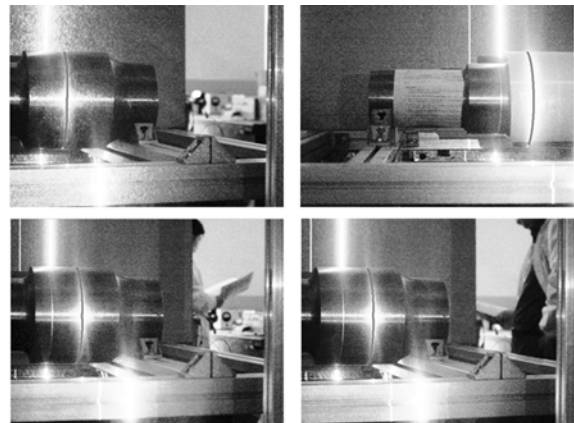


图 14 特征光条提取结果

Fig. 14 Extraction results of characteristic light stripe

利用本文所提出的特征光条提取方法对不同角度下的特征光条进行多次提取实验,结果如图 14 所示。从获得的特征光条提取图像结果可知,该方法能够正确找到特征光条区域,准确地提取出特征光条中心,具有良好的鲁棒性。

为进一步验证本文所采用的特征光条提取方法的效果,对标准轴零件进行结构光法测量。通过灰度重心法^[8]、曲线拟合法^[7]和本文方法对测量图像

进行特征光条中心提取,并计算被测轴直径。通过对表 1 中结果分析可知,本文方法求得的直径均方差小于 0.015 mm,而且该方法所提取的光条中心较灰度重心法^[8]和曲线拟合法^[7]更加稳定。

6 结 论

本文对动车组车轴视觉测量中的特征光条提取方法进行了研究。首先通过使用特殊的结构元对图像进行腐蚀,确定待求特征光条感兴趣区域。然后通过移动阈值法对感兴趣区域进行二值化处理,获得二值化图像;接着通过形态学处理降低噪声并用按行取形心的方法求得基准线并在基准线基础上逐点求取法向量;然后在法向量方向上求取二值图形心,从而求得光条中心;最后,通过实验对本文提出的方法进行验证,通过与灰度重心法和曲线拟合法所得结果的比较显示,本文方法对特征光条的提取具有良好的可行性、准确性和鲁棒性,完全能够满足动车组光滑金属曲面测量中对特征光条提取技术的要求。

表 1 不同方法求取光条中心所测轴径比较 (mm)

Tab. 1 Comparison of axle diameter of laser strip center lines extracted by different methods

序号	灰度重心法	曲线拟合法	本文方法
1	129.968 5	130.015 5	129.981 7
2	129.959 4	129.996 7	130.000 6
3	130.037 3	129.967 5	129.988 0
4	129.958 7	126.968 0	130.014 3
5	129.986 8	130.024 0	130.003 1
6	130.040 2	129.967 1	129.983 4
均值(mm)	129.991 8	129.989 8	129.995 2
标准差(mm)	0.037 8	0.025 9	0.012 9

参考文献:

- [1] 许丽,张之江. 结构光测量系统的误差传递分析[J]. 光学精密工程, 2009, 17(2): 306-313.
XU L, ZHANG ZH J. Error propagation analysis of structured light system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(2): 306-313. (in Chinese)
- [2] ZHU W, LI J L, TIAN L, et al.. High-speed large dimensional measurement based on line structured light and camera scanning[C]. 2014 6th International Conference on Intelligent Human-Machine Systems and Cybernetics, Hangzhou, China; IHMSC, 2014: 232-236.
- [3] GAO S Y, ZHAO M Y, ZHANG L, et al.. Dual-beam structured light vision system for 3D coordinates measurement [C]. *Proceedings of the 7th World Congress on Intelligent Control and Automation, Chongqing, China*: WCICA, 2008: 3683-3686.
- [4] 熊会元,宗志坚,陈承鹤. 线结构光条纹中心的全分辨率精确提取[J]. 光学精密工程, 2009, 17(5): 1057-1062.
XIONG H Y, ZONG ZH J, CHEN CH H. Accu-
- rately extracting full resolution centers of structured light stripe [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(5): 1057-1062. (in Chinese)
- [5] 陈天飞,马孜,吴翔. 基于主动视觉标定线结构光传感器中的光平面[J]. 光学精密工程, 2012, 20(2): 256-263.
CHEN T F, MA Z, WU X. Calibration of light plan in line structured light sensor based on active vision [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(2): 256-263. (in Chinese)
- [6] 李丹,耿楠,亢娟娜. 复杂背景下光条中心提取算法研究[J]. 计算机应用与软件, 2013, 30(3): 271-314.
LI D, GENG N, KANG J N. Research on laser stripe center extraction algorithm under complex background [J]. *Computer Applications and Software*, 2013, 30(3): 271-314. (in Chinese)
- [7] 刘涛,王宗义,于秀辉,等. 基于自适应窗曲线拟合的结构光条纹中心提取[J]. 半导体光电, 2010, 31(1): 151-154.
LIU T, WANG Z Y, YU X H, et al.. Curve fitting method based on adaptive window for center extracting of structured light stripe [J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2010, 31(1): 151-154. (in Chi-

- nese)
- [8] 李中伟,王从军,史玉升.一种结合梯度锐化和重心法的光条中心提取算法[J].中国图象图形学报,2008,13(1):64-67.
LI ZH W, WANG C J, SHI Y SH. An algorithm for detecting center of structured light stripe combining gradient sharpening with barycenter method [J]. *Chinese Journal of Image and Graphics*, 2008, 13(1): 64-67. (in Chinese)
- [9] 孙盼庆,杨永跃,何亮亮.一种改进的高斯拟合法在光带中心提取中的应用[J].电子设计工程,2012,20(13):179-185.
SUN P Q, YANG Y Y, HE L L. An improved gaussian fitting method used in light-trap center acquiring[J]. *Electronic Design Engineering*, 2012, 20(13): 179-185. (in Chinese)
- [10] 杜颖,张国雄,李真,等.金属表面对光学非接触测头的影响[J].光电工程,2000,27(5):62-65.
DU Y, ZHANG G X, LI ZH, *et al.*. Influence of metal surface on optical non-contact probe [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2000, 27(5): 62-65. (in Chinese)
- [11] 安福生.金属表面光学反射特性的研究[J].计量学报,1988,9(1):51-54.
AN F SH. Study on the optical properties of metal reflector[J]. *Acta Metrologica Sinica*, 1988, 9(1): 51-54. (in Chinese)
- [12] 郑万泉,董抒雁,唯小宇,等.金属表面在反射方向产生光学二次谐波的研究(II)[J].光学学报,1989,9(6):487-492.
ZHENG W Q, DONG SH Y, WEI X Y, *et al.*. Study of optical two harmonic in the direction of reflection on the surface of metal (II) [J]. *Acta Optica Sinica*, 1989, 9(6): 487-492. (in Chinese)

作者简介:



刘长英(1974—),男,黑龙江望奎人,副教授,硕士生导师,1998年于吉林工业大学获得学士学位,2001年于吉林大学获得硕士学位,2006年于哈尔滨工业大学获得博士学位,主要从事机器视觉、车辆测控技术方面的研究。E-mail: liuchangy@jlu.edu.cn

通讯作者:



杨大鹏(1980—),男,黑龙江望奎人,副教授,硕士生导师,2002年、2005年、2008年于吉林大学分别获得学士、硕士、博士学位,主要从事地震测量传感器技术及自动测控技术等方面的研究。E-mail: ydp@jlu.edu.cn