

基于高斯积分曲面拟合的亚像素边缘定位算法*

段振云¹, 王 宁¹, 赵文珍¹, 赵文辉¹, 冯宝强²

(1. 沈阳工业大学机械工程学院 沈阳 110870; 2. 沈阳机床股份有限公司齿轮分公司 沈阳 110041)

摘要:针对现有亚像素边缘定位算法存在精度不高、计算复杂的问题,提出一种基于高斯积分曲面拟合的亚像素边缘定位算法。根据单边阶跃状边缘特征,构建边缘法截线的高斯积分模型,在确定边缘过渡带的基础上,将拟合曲面区域内的像素点信息转化为边缘曲线的活动坐标,并对转化后的像素点坐标与灰度值按照高斯积分模型进行拟合,准确定位图像的亚像素边缘。采用所述视觉测量系统,用量块直线边缘进行实验,并与传统高斯曲面拟合亚像素边缘定位算法比较,证明基于高斯积分曲面拟合的亚像素边缘定位算法具有较高的定位精度,一等量块的直线度误差在 $1\ \mu\text{m}$ 以内,计算速度提高一倍。采用该算法确定亚像素边缘时,可通过修正高斯积分模型的均值,有效补偿光源强度造成的误差。本算法可以应用于齿轮等高精度机械零件的测量。

关键词:视觉测量;法截线;过渡带;高斯积分;亚像素

中图分类号: TH161 TP391 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 510.40

Sub-pixel edge location algorithm based on Gauss integral curved surface fitting

Duan Zhenyun¹, Wang Ning¹, Zhao Wenzhen¹, Zhao Wenhui¹, Feng Baoqiang²

(1. School of Mechanical Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang, 110870, China;

2. Gear Branch, Shenyang Machine Tool Co. Ltd., Shenyang 110041, China)

Abstract: Aiming at the problems of low accuracy and complex calculation in existing sub-pixel edge location algorithm, a sub-pixel edge location algorithm is proposed based on Gauss integral curved surface fitting. According to the characteristic of unilateral step edge, the edge normal section line Gauss integral model is constructed, on the basis of determining edge transition zone, the pixel information in fitting curved surface area is transformed into the active coordinates of edge curve, and the transformed pixel coordinates and gray information are fitted according to Gauss integral model, the accurate sub-pixel edge of the image is located. With the vision measurement system described in this paper, the experiment on the gauge block line edge was conducted, and the result was compared with that for traditional Gauss curved surface fitting sub-pixel edge location algorithm. The result proves that the sub-pixel edge location algorithm based on Gauss integral curved surface fitting has high location accuracy, the linear error of the first grade gauge block is within $1\ \mu\text{m}$, and the computing speed is doubled. When the algorithm is adopted to locate sub-pixel edge, the error caused by light source intensity can be effectively compensated through modifying the average of the Gauss integral model. Therefore, this algorithm can be applied to the high accurate measurement of mechanical parts, such as gears and etc.

Keywords: vision measurement; normal section line; transition zone; Gauss integral; sub-pixel

1 引 言

机器视觉测量是以光学为基础,融合计算机技术、图像处理技术等现代科学技术为一体,将被测对象的图像

当作检测和传递信息的手段或载体加以利用的测量方法。它具有高灵敏度、高分辨率、高速度、非接触等优点,可以满足现代精密测量技术的发展需要,目前已广泛应用于诸多领域^[1-3]。随着对测量精度的要求越来越高,如何提高测量精度成为亟待解决的问题。其中影响测量精

度的因素之一是边缘的定位精度,它也是视觉测量中最基础、最关键的内容之一,是后续测量的前提。因此,如何进一步提高边缘定位算法的精度成为研究热点。

传统的像素级边缘定位算法无法满足高精度测量要求,为此,提出了更高精度的亚像素边缘定位算法,其原理是先用传统的边缘定位算法进行粗定位,然后在像素级边缘的基础上进行亚像素边缘定位。目前的亚像素边缘定位算法主要分为以下3类:矩方法、插值法和拟合法^[4-6]。拟合法中具有代表性的是高斯拟合亚像素定位算法,该算法在进行边缘定位时,先对窗口内的边缘梯度幅值进行高斯曲面拟合,再引入像素级边缘的梯度方向来获得高斯曲面和梯度平面的交线,即该方向上的高斯曲线,进一步求得高斯曲线的极值点,确定所求边缘。其存在的问题是在确定亚像素边缘位置时,需要进行复杂的数学推导和运算,计算量较大,不利于实时处理,并且灰度对梯度幅值较为敏感,当根据梯度幅值拟合高斯曲面求边缘时,可能产生较大的误差^[7-8]。

提出一种基于高斯积分曲面拟合的亚像素边缘定位算法,在建立阶跃边缘法向的正态分布函数模型的基础上,确定边缘过渡带,并将曲面拟合窗口内像素点的坐标和灰度值转化为边缘曲线的活动坐标,通过查标准正态分布表,准确定位亚像素边缘,可有效提高测量精度和速度。

与传统高斯拟合亚像素定位算法相比,所提算法不需要进行梯度幅值计算,避免了梯度幅值对边缘定位的影响,同时直接利用像素点的坐标和灰度值信息查表确定亚像素边缘,简化了算法,具有精度高、计算速度快等优点。

2 边缘过渡带

为了运用数学算法来处理和分析图像,需要用数学函数来描述一幅图像,经数字化后的数字图像从数学形式上看,就是一数字矩阵。矩阵元素排列的位置 (i, j) 代表对应像素点在图像上的位置,矩阵中元素数值 $P(i, j)$ 对应于像素点的灰度值,则构成灰度曲面。因此,可通过对矩阵进行各种运算和应用曲面理论,实现边缘位置的精确定位。

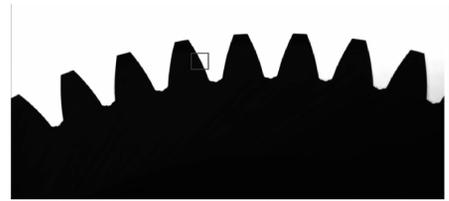
边缘过渡带是图像中存在的特定区域,它介于目标与背景之间,既有边缘的特点,可以将不同区域分开;又有区域的特点,其自身有宽度,并且面积不为零。边缘过渡带的灰度值一般介于目标灰度值与背景灰度值之间,且灰度值的变化率比其他区域的变化率大,包含的信息比较丰富^[9-12]。

图1(a)所示为5级渐开线圆柱直齿轮的背光数字图像,截取其局部渐开线齿廓,如图1(b)所示,可以看出,齿

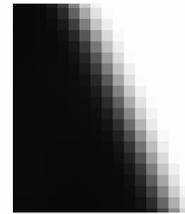
轮的边缘只在边缘过渡带上。为了准确定位,提取全部边缘过渡带上的像素点进行曲面拟合,具体方法如下:

1) 根据八邻域边缘追踪算法确定图像的像素级边缘,该边缘具有连续、单像素的特点;

2) 以获取的像素级边缘为中心,逐点确定半径为3个像素的圆,将在圆内的所有像素点保留,剔除相同点,则得到宽度为6个像素的图像边缘过渡带。



(a) 齿轮原图像
(a) Original image of the gear



(b) 齿轮局部边缘
(b) Local edge of the gear

图1 背光数字图像

Fig. 1 Backlit digital image

3 过渡带高斯积分曲面拟合

3.1 高斯积分模型建立

由于CCD为光学积分元件,根据方形孔径采样定理,在固定时间间隔内以固定大小的面积对投射在其感光面上的光强进行积分,输出的结果就是图像的灰度值,因此,图像的单边阶跃状边缘灰度值可用高斯积分模型表示^[13-16],即:

$$P(u) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \int_{-\infty}^u e^{-\frac{(t-\mu)^2}{2\sigma^2}} dt \quad (1)$$

式中: t 为边缘法截线上各像素点到像素级边缘的距离, μ 为亚像素边缘点到像素级边缘的距离。

直接对该积分表达式求解比较困难,为了求出高斯积分模型的均值点 μ ,将式(1)进行变换,令 $u = \frac{t-\mu}{\sigma}$,可得:

$$P(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\frac{t-\mu}{\sigma}} e^{-\frac{u^2}{2}} du \quad (2)$$

将图像的灰度值进行归一化处理,使其符合标准正态分布,即:

$$\phi_i(t) = \frac{P(t)}{K} = \frac{1}{K} \Phi\left(\frac{t_i - \mu}{\sigma}\right) \quad (3)$$

式中: K 为图像背景与前景的灰度差。

根据标准正态分布表,由 $\varphi_i(t)$ 可得到式(2)中的积分上限 a_i , 即 $a_i = \frac{t_i - \mu}{\sigma}$ 。则:

$$t_i = \sigma a_i + \mu \quad (4)$$

可以看出 a_i 与 t_i 成线性关系,拟合直线的截距就是所求亚像素边缘点到像素级边缘的法向距离 μ ,如图2所示,通过坐标变换即可得到亚像素边缘点的坐标位置。将各亚像素边缘点进行拟合,可以获得被测对象的亚像素边缘。

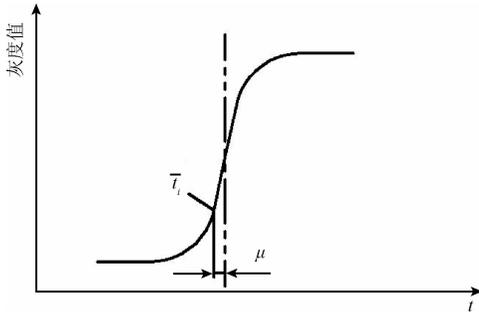


图2 边缘法向高斯积分模型

Fig.2 Edge normal gauss integral model

3.2 高斯积分曲面拟合

根据建立的高斯积分模型,可知通过拟合高斯积分曲线确定亚像素边缘理论上可行,但由于位于边缘法截线上的像素点数量有限,会对精度造成一定的影响,为了解决该问题,提出高斯积分曲面拟合的思想。

如图3所示,高斯积分曲面可以看作是以像素级边缘法截面上的高斯积分曲线为母线,沿导线为待求的亚像素级边缘曲线运动所形成的轨迹面。其重要的几何性质是沿母线各点处曲面的法线共面。针对这一性质,在图像平面内建立边缘曲线活动坐标系,以各像素点到像素级边缘曲线的法向距离 t_i 为坐标。根据像素点坐标 t_i 和灰度值拟合高斯积分曲面,求得亚像素级边缘。

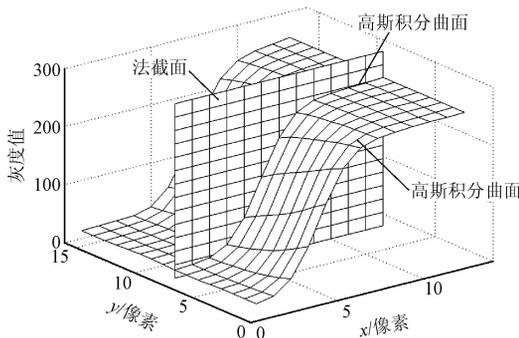


图3 边缘灰度曲面

Fig.3 Edge gray value surface

在根据八邻域边缘追踪算法确定图像的像素级边缘后,分段进行亚像素边缘定位。以像素级边缘点为中心,适当选取曲面拟合区域,且保证在边缘法线方向上,区域包含边缘过渡区和前景与背景图像部分。对于一个计算点而言,选定的曲面拟合区域的灰度符合高斯积分模型,将区域内像素点的图像坐标转换为边缘曲线的活动坐标,即各像素点到像素级边缘的法向距离 t_i 。根据各像素点的灰度值 P_i ,可知曲面拟合区域内的灰度差 K ,实现灰度值归一化。通过归一化灰度值,查标准正态分布表得到 a_i ,将 a_i 与 t_i 进行线性拟合,求得亚像素边缘点到像素级边缘的距离 μ ,从而得到精确的亚像素边缘。

在进行高斯积分曲面拟合时,选取的曲面拟合区域为沿边缘方向的带状域,将区域内所有像素点的信息转换到计算点所在法线方向相当于将多个边缘法截线的信息叠加到一个平面内,起到了均化的作用,同时,像素点被纠正到理论高斯积分曲面上,可极大地消除噪声的影响。

4 实验

采用的视觉测量系统主要硬件为:Basler piA2400-17gc 全帧型面阵 CCD 黑白像机,其分辨率为 2 448 像素 × 2 050 像素;TC2348 双远心镜头,视场为 48 mm × 36 mm,畸变率 < 0.1%,景深 20 mm;LED 蓝光平行光源,光源控制器采用脉冲宽度调制 (pulse width modulation, PWM) 调制方法,分 1 000 级调节,对应光源电压为 0 ~ 24 V。

4.1 亚像素边缘定位误差实验

按 JJG2056-90《长度计量器具(量块部分)检定系统》规范,1 ~ 10 mm 的 1 等量块测量面的精度可以达到 0.05 μm,且边缘简单,有利于高精度边缘定位,因此分别使用本文算法和现有高斯拟合算法对 1 等量块进行亚像素边缘定位,对两种算法进行比较,以验证本文算法的有效性。

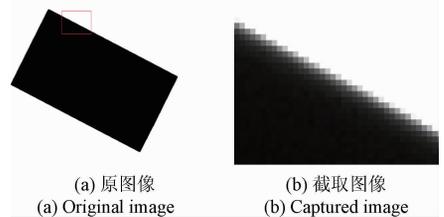


图4 量块图像

Fig.4 Gauge block images

获取的 10 mm 量块图像如图 4(a) 所示,对量块上部分边缘进行亚像素定位,如图 4(b) 所示。采用本文算法进行边缘定位时,以像素级边缘为中心,取半径为 3 个像

素的圆,将在圆内的所有像素点保留,剔除相同点,则确定齿轮边缘的过渡带。对于像素级边缘坐标为(739, 293)的这一点而言,其过渡带如图5所示。将过渡带上所有像素点的信息转换到像素级边缘的法截线上,则坐标 t_i 与归一化灰度值的关系如图6所示,可以看出过渡带上的像素点的灰度值分布符合高斯积分模型。在边缘位置积分上限 a_i 与法向距离 t_i 成线性关系,如图7所示,求得高斯积分模型的均值为0.413像素。根据像素级边缘坐标和法向矢量,可求得对应的亚像素边缘点坐标为(739.089, 292.925)。

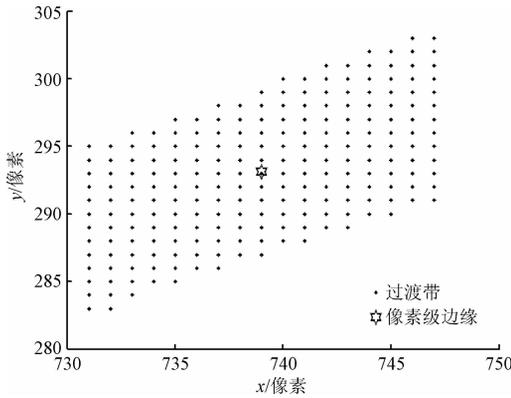


图5 量块边缘过渡带
Fig. 5 Gauge block edge transition zone

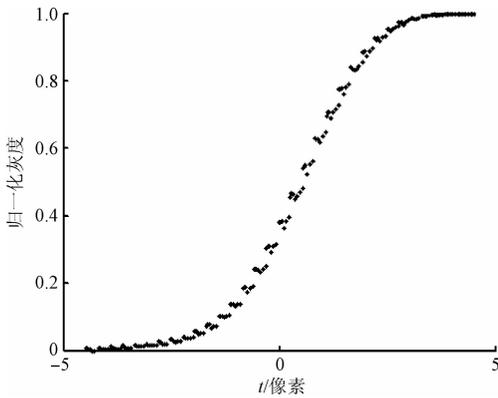


图6 曲面拟合区域灰度分布
Fig. 6 Gray value distribution of the curved surface fitting zone

分别使用本文算法和高斯拟合算法进行亚像素定位的结果如图8所示。可以看出两种方法确定的亚像素边缘具有一致性,验证了本文算法的有效性。通过图9所示的边缘点到拟合直线的距离可以看出,采用高斯拟合算法确定的亚像素边缘局部跳跃量较大,直线度误差为 $4\ \mu\text{m}$,采用本文算法确定的亚像素边缘比较平滑,直线度误差为 $0.7\ \mu\text{m}$ 。从计算效率来看,采用现有高斯拟合

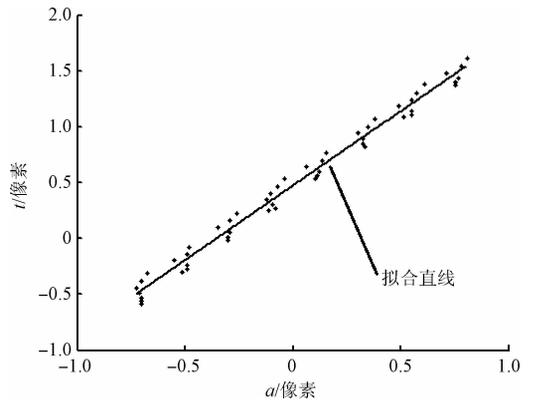


图7 积分上限 a 与法向距离 t 的线性关系
Fig. 7 Linear relationship between integral upper limit a and normal distance t

算法的程序执行时间为81 ms,采用本文算法的程序执行时间为43 ms,速度提高一倍。

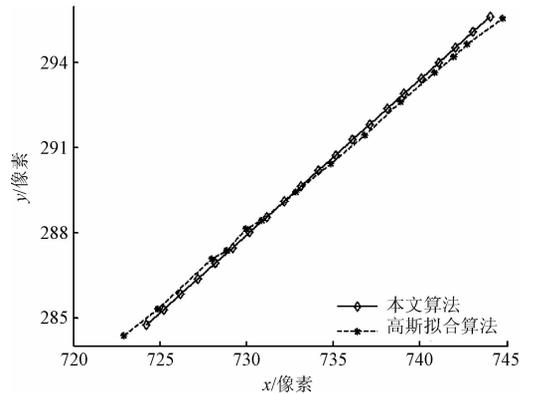


图8 亚像素边缘
Fig. 8 Sub-pixel edge

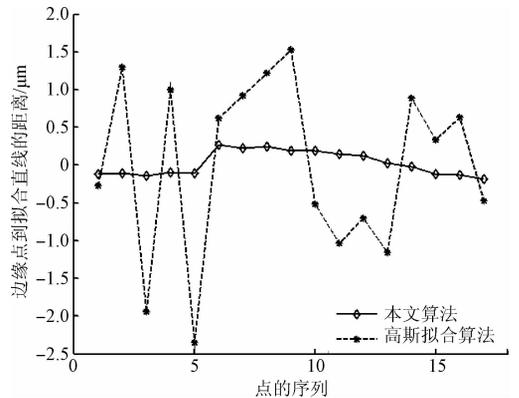


图9 边缘点到拟合直线的距离
Fig. 9 Distance between pixel edge points and fitting line

为了验证本文算法的测量精度,对测量系统标定后,分别使用本文算法和高斯拟合算法进行量块直线边缘定

位,多次测量同一量块不同位姿时的尺寸。对于其中一条获取的量块亚像素边缘进行最小二乘法直线拟合,并计算另一条量块亚像素边缘上各测量点到拟合直线的距离,以所有距离的平均值作为量块的测量尺寸,将理论尺寸和测量尺寸进行比较,得到测量误差。两种算法的测量误差结果如表1所示。

表1 测量误差比较

Table 1 Comparison of the measurement errors

(μm)		
测量图像	本文算法	高斯拟合算法
位姿1	-0.227	1.924
位姿2	0.389	1.852
位姿3	-1.279	2.265
位姿4	0.337	2.675
位姿5	-1.056	1.101
位姿6	-1.930	2.486
平均值	-0.628	2.051

由表1可知,采用本文算法确定的亚像素边缘可靠性较高,与高斯拟合算法相比测量误差较小。考虑到光源强度会对边缘的精确定位产生重要影响^[17],需要根据光源强度位置误差补偿模型,在边缘的法向进行误差补偿,而本文所研究的高斯积分模型正是在边缘的法线方向,可以通过所求 μ 值与补偿值相加进行补偿,进一步提高测量精度。

4.2 齿轮齿廓偏差测量实验

将本文算法应用于齿轮的高精度测量,所测齿轮为标准的渐开线直齿圆柱齿轮,其基本参数为模数 $m = 2$,齿数 $z = 60$,压力角 $\alpha = 20^\circ$,精度等级5级。

获取齿廓的像素级边缘,采用最小二乘圆拟合和直线拟合相结合,逐次逼近齿轮中心的方法,确定齿轮中心位置^[18],在此基础上,将每条齿廓边缘进行渐开线拟合,得到其初始相位角 φ_j ,并求出每个像素点的相位角 φ_i ,已知齿轮的基圆理论半径 r_b ,利用渐开线初始相位角的性质,则法向距离:

$$t_i = r_b \times (\varphi_i - \varphi_j) \quad (5)$$

根据高斯积分曲面拟合原理,将通过归一化灰度值查表得到的各像素点对应的 a_i 与法向距离 t_i 进行线性拟合,精确定位亚像素边缘。其中,式(5)解决了根据距离公式求像素点到渐开线的距离比较复杂的问题,简化了算法。测量的多个齿廓的齿廓偏差如表2所示。

表2 齿廓偏差值

Table 2 Tooth profile deviation

(μm)	
齿廓序列	齿廓偏差
1	3.197
2	4.613
3	4.125
4	5.948
5	4.310
6	4.619
7	5.421
8	5.903

根据GB/T 10095中的有关规定,5级精度的渐开线直齿圆柱齿轮的齿廓偏差允许值是 $8 \mu\text{m}$,由表2测量结果可知,所测齿廓偏差均小于最大允许值,则该齿轮满足精度要求。

5 结 论

构建了边缘法向的高斯积分模型,在确定边缘过渡带的基础上,将曲面拟合区域内像素点的图像坐标转换为边缘曲线的活动坐标,进而将像素点的坐标和灰度值进行拟合,求得高斯积分模型的均值 μ ,确定图像的亚像素边缘位置。本算法广义上属于曲面拟合,具有曲面拟合精度高的优点,可最大限度地消除噪声的影响。与现有高斯拟合算法相比,本算法通过坐标变换,简化了曲面拟合问题,减少了计算量,计算速度提高一倍,并且测量误差较小。另外,采用本算法定位亚像素边缘有利于进行光源强度位置误差补偿,只需将所求 μ 值与补偿值相加,简单易行。因此,本算法可以应用于齿轮等高精度机械零件的测量。

参考文献

- [1] ZHAO P, QIANG N G, BANG P Z. Simultaneous perimeter measurement for multiple planar objects [J]. Optics and Laser Technology, 2009, 41(2): 186-192.
- [2] SCHNEIDER S C, RUPITSCH S J, ZAGAR B G. Signal processing for laser speckle strain-measurement techniques [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2007, 56(6): 2681-2687.
- [3] 王新新,徐江伟,邹伟金,等. TFT-LCD 缺陷检测系统的研究 [J]. 电子测量与仪器学报, 2014, 28(3): 278-284.

- WANG X X, XU J W, ZOU W J, et al. Research on detection system for TFT-LCD defects [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2014, 28(3):278-284.
- [4] TAI S C, YANG S M. A fast method for image noise estimation using laplacian operator and adaptive edge detection [C]. International Symposium on Communications, Control and Signal Processing, 2008: 1077-1079.
- [5] 刘红亮,陈维义,许中胜. 曲面拟合法和梯度法相结合的图像亚像素配准算法[J]. 国防科技大学学报, 2015,37(5):180-185.
- LIU H L, CHEN W Y, XU ZH SH. An image sub-pixel registration algorithm based on combination of curved surface fitting method and gradient method[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2015,37(5): 180-185.
- [6] 吴晓军,邹广华. 基于边缘几何特征的高性能模板匹配算法[J]. 仪器仪表学报,2013,34(7):1462-1468.
- WU X J, ZOU G H. High performance template matching algorithm based on edge geometric features[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument. 2013, 34 (7): 1462- 1468.
- [7] 李帅,卢荣胜,史艳琼,等. 基于高斯曲面拟合的亚像素边缘检测算法[J]. 工具技术,2011,45(7):79-82.
- LI SH, LU R SH, SHI Y Q, et al. Sub-pixel edge detection algorithm based on Gauss surface fitting[J]. Tool Engineer, 2011,45(7):79-82.
- [8] 高世一,杨凯珍. 变边限高斯拟合提取激光条纹中心线方法的研究[J]. 仪器仪表学报,2011,32(5): 1132-1137.
- GAO SH Y, YANG K ZH. Research on central position extraction of laser strip based on varied- boundary Gaussian fitting [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument. 2011,32(5):1132- 1137.
- [9] 吴俊芳,刘桂雄. 图像边缘过渡区的数学表征方法研究[J]. 仪器仪表学报,2010,31(8):55-60.
- WU J F, LIU G X. Research on mathematical expression of image edge transition region[J]. Journal of Scientific Instrument, 2010,31(8):55-60.
- [10] 冯涛,周祖安,刘其真. 基于局部复杂度的图像过渡区处理研究[J]. 中国图象图形学报,2008,13(10): 1894-1897.
- FENG T, ZHOU Z AN, LIU Q ZH. Analysis of the image transition region processing based on local complexity[J]. Journal of Image and Graphics, 2008, 13(10):1894-1897.
- [11] 张之敬,杜芳,金鑫,等. 微小尺寸零件复杂边缘识别算法[J]. 光学精密工程,2009,17(2):356-361.
- ZHANG ZH J, DU F, JIN X, et al. Complex edge recognition algorithm of micro-accessory[J]. Optics and Precision Engineering, 2009, 17(2):356-361.
- [12] 何博侠,张志胜,戴敏,等. 基于序列局部图像的高精度测量[J]. 光学精密工程,2008,16(2):367-373.
- HE B X, ZHANG ZH SH, DAI M, et al. A high - precision dimension measurement method based on sequential partial images [J]. Optics and Precision Engineering, 2008, 16(2):367-373.
- [13] 贺忠海,王宝光. 利用曲线拟合方法的亚像素提取算法[J]. 仪器仪表学报,2003,24(2):195-197.
- HE ZH H, WANG B G. Sub-pixel extraction algorithm using curve fitting method [J]. Journal of Scientific Instrument, 2003, 24(2):195- 197.
- [14] 陈阔,冯华君,徐之海,等. 亚像素精度的行星中心定位算法[J]. 光学精密工程,2013,21(7):1881-1889.
- CHEN K, FENG H J, XU ZH H, et al. Sub-pixel location algorithm for planetary center measurement[J]. Optics and Precision Engineering, 2013, 21 (7): 1881-1889.
- [15] 张进,王仲,李霞. 微型零件中圆孔的高精度定位方法[J]. 电子测量与仪器学报,2008,22(3):47-50.
- ZHANG J, WANG ZH, LI X. High precision algorithm for center positioning of circle hole in micro-parts[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2008, 22(3):47-50.
- [16] 王静,王海亮,向茂生,等. 基于非极大值抑制的圆目标亚像素中心定位[J]. 仪器仪表学报,2012,33(7): 1460-1468.
- WANG J, WANG H L, XIANG M SH, et al. Sub-pixel accuracy central location of circle target based on non-maximum suppression[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument. 2012,33(7):1460- 1468.
- [17] 段振云,王宁,赵文辉,等. 基于点阵标定板的视觉测量系统标定方法研究[J]. 光学学报,2016,36(5): 143-151.
- DUAN ZH Y, WANG N, ZHAO W H, et al. Study on calibration method based on lattice calibration plate in vision measurement system [J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(5): 143-151.
- [18] 王宁,段振云,赵文辉,等. 视觉测量中齿轮外轮廓分段方法研究[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2016(4):117-120.

WANG N, DUAN ZH Y, ZHAO W H, et al. Research on method of gear outer contour segmentation in vision measurement[J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2016(4):117-120.

作者简介



段振云,1993年于西安交通大学获得学士学位,1999年于沈阳工业大学获得硕士学位,2002年于大连理工大学获得博士学位,现为沈阳工业大学教授、博士生导师,主要研究方向为复杂曲面加工和视觉测量。

E-mail: 13604045543@139.com

Duan Zhenyun received his B. Sc. degree in 1993 from Xi'an Jiaotong University, M. Sc. degree in 1999 from Shenyang University of Technology and Ph. D. degree in 2002 from Dalian

University of Technology. Now, he is a professor and doctoral supervisor in Shenyang University of Technology. His main research interest includes complex surface machining and vision measurement.



王宁 (通讯作者),2013年于沈阳工业大学获得学士学位,现为沈阳工业大学博士研究生,主要研究方向为视觉测量和齿轮测量。

E-mail: wangningcom@126.com

Wang Ning (Corresponding author) received her B. Sc. degree in 2013 from Shenyang University of Technology. Now, she is a doctoral candidate in Shenyang University of Technology. Her main research interest includes vision measurement and gear measurement.