

# 自适应光强变化的动态边缘位置提取方法

杜文华, 郭小刚, 曾志强, 王俊元  
(中北大学, 太原 030051)

**摘要:** 目的 研究 LED 背光源光照强度变化对视觉测量系统二维尺寸测量精度的影响。方法 通过对图像灰度与光源强度的关系进行理论推导和实验探究, 得出背光源强度对图像边缘位置的影响规律。结果 随着光源强度的增强, 边缘位置附近像素灰度值逐渐增大, 边缘位置发生内缩, 可达 4.7 个像素 ( $20.03 \mu\text{m}$ )。通过自适应光强变化的动态边缘位置提取方法进行补偿, 各标准轴直径测量误差减小到 1 个像素 ( $4.26 \mu\text{m}$ ) 以内。结论 光照强度变化对影像测量系统测量精度有很大的影响, 自适应光强变化的动态边缘位置提取方法能够有效补偿测量误差, 提高测量精度。

**关键词:** 视觉测量系统; 尺寸测量; 光源强度; 边缘位置; 测量误差

**中图分类号:** TP391.4    **文献标识码:** A    **文章编号:** 1001-3563(2018)03-0162-05

**DOI:** 10.19554/j.cnki.1001-3563.2018.03.031

## A Dynamic Edge Position Extraction Method for Adaptive Light Intensity Variation

DU Wen-hua, GUO Xiao-gang, ZENG Zhi-qiang, WANG Jun-yuan  
(North University of China, Taiyuan 030051, China)

**ABSTRACT:** The work aims to study the influence of the light intensity change of the LED backlight source on the accuracy of the two-dimensional size measurement of the visual measurement system. Through carrying out the theoretical derivation and experimental study of the relationship between image gray scale and light intensity, the influence rule of the backlight intensity on the edge position of the image was obtained. With the enhancement of the backlight intensity, the pixel gray value near the edge position gradually increased and edge position shrank up to 4.7 pixels ( $20.03 \mu\text{m}$ ). The measurement error of the diameter of each standard axis was reduced to within 1 pixel ( $4.26 \mu\text{m}$ ) in the method of the dynamic edge position extraction with adaptive light intensity change. The light intensity change has great influence on the measurement accuracy of the image measuring system. The method of dynamic edge position extraction with adaptive light intensity change can effectively compensate the measurement error and improve the measurement accuracy.

**KEY WORDS:** visual measurement system; size measurement; backlight intensity; edge position; measurement error

随着制造业及包装工程行业自动化水平的不断提高, 对包装及产品检测的自动化程度和检测效率提出了更高的要求。机器视觉以其非接触性、速度快、精度高、实时性好等优点被广泛应用于包装尺寸测量及产品检测等领域, 视觉测量系统包括照明、光学成像与采集、图像处理单元这 3 个部分。光学照明系统是其中重要的组成部分, 优良光源和照明方案的选择和应用是视觉测量系统应用的关键。

近年来, 国内外学者针对照明系统光强变化对视觉测量的影响进行了研究, 文献[1]分析了图像灰度与光照强度的关系, 并采用动态调整像素当量值方法提高测量精度, 但并未理论分析光强对像素当量值的影响机理。文献[2]通过探究边缘位置与光强及阈值的关系, 提出了自适应光强变化的动态阈值边缘检测方法, 但未对边缘检测中使用的像素梯度进行研究。文献[3]对 CCD 电荷量与光强的关系进行研究, 提出了

收稿日期: 2017-06-30

基金项目: 山西省应用基础研究项目 (201601D102025)

作者简介: 杜文华 (1968—), 女, 中北大学教授, 主要研究方向为机器视觉、图像测量技术、机械动力学。

一种基于平均灰度值的最佳光强评价方法以获取不同外界光强下的清晰图像。为研究照明系统光强变化对视觉测量系统二维尺寸测量的影响,分析其影响机理和规律,并对由光强变化造成的视觉测量系统测量误差进行有效补偿,提高视觉测量系统的测量精度。文中首先从理论上分析图像灰度与像元面接收到的光照强度之间的关系,利用实验分析背光源强度对图像梯度和边缘位置的影响;然后根据图像梯度及边缘位置的变化规律,提出一种自适应光强变化的动态边缘位置提取方法,对由光强变化造成的边缘位置移动进行补偿,得到补偿后的边缘坐标;最后通过多组实验验证该方法的有效性。

## 1 理论依据

### 1.1 CCD 图像灰度与光照强度关系的理论推导

CCD 图像传感器中单一像元的理论电荷量计算公式为:

$$Q_{in} = \frac{\eta\delta S}{hv} \int E_e dt \quad (1)$$

式中: $Q_{in}$  为该像元的电荷量; $\eta$  为光电转换效率; $\delta$  为电子的电荷量; $S$  为像元面积; $h$  为普朗克常量; $v$  为入射光的频率; $t$  为曝光时间; $E_e$  为该像元面上接收到的光照强度。其中,由于曝光时间  $t$  很小,CCD 图像传感器表面的光照强度  $E_e$  在积分时间  $t$  内是一个定值,所以  $Q_{in}$  为曝光时间  $t$  的线性函数。 $g_z$  为光电转换系数,令  $g_z = \frac{\eta\delta S}{hv}$ , 则有:

$$Q_{in} = g_z E_e t \quad (2)$$

光生电荷经过转移之后通过 CCD 的输出结构转换为电压信号,电压信号经过 AD 转换变为数字信号,则该电荷经转换得到的灰度值为:

$$G = g_o Q_{in} = g_o g_z E_e t = g_s E_e t \quad (3)$$

式中: $G$  为图像的灰度值; $g_o$  为通道的输出增益系数; $g_s$  为输出增益系数与光电转换增益系数的乘积。

将式(3)中的  $g_s$  拆分成 2 个增益的乘积,即  $g_v g_t$ , 其中  $g_v$  为模拟前端(AFE)中可变增益放大器(VGA)的增益, $g_t$  为光电转换增益系数和电路模拟增益的乘积,该增益因成像系统不同而不同,且成像系统确定时该增益可确定,因此不需要计算  $g_t$  的具体值。令相对光照强度  $E_r = g_t E_e$ , 则式(3)可改写为:

$$G = g_v E_r t \quad (4)$$

由式(4)可知,对于同一 CCD 图像传感器而言,在曝光时间  $t$  和增益  $g_v$  均相同的情况下,图像像素灰度值与 CCD 传感器像元面上接收到的相对光照强度  $E_r$  呈线性关系<sup>[4]</sup>。

### 1.2 Sobel 亚像素边缘提取

Sobel 经典算法利用水平和垂直梯度模板分别与图像  $A$  进行邻域卷积计算像素  $(x, y)$  处的水平和垂直方向梯度:

$$G_x = d_x \cdot A = [f(x+1, y-1) + 2f(x+1, y) + f(x+1, y+1)] - [f(x-1, y-1) + 2f(x-1, y) + f(x-1, y+1)]$$

$$G_y = d_y \cdot A = [f(x-1, y-1) + 2f(x, y-1) + f(x+1, y-1)] - [f(x-1, y+1) + 2f(x, y+1) + f(x+1, y+1)]$$

定义该像素的梯度为:

$$G = (\sqrt{|G_x|^2 + |G_y|^2}) / 4$$

设定上下阈值为  $T_l$  和  $T_h$ , 则边缘判断准则为:若  $G < T_l$ , 则该像素点被舍弃;若  $T_l < G < T_h$ , 并与高于阈值的像素点连接时,则为边缘点;若  $G > T_h$ , 则该像素点为边缘点<sup>[5]</sup>。采用二次插值函数对已确定的边缘点  $(m, n)$  进行插值得到亚像素边缘坐标。在梯度图像  $G(i, j)$  的  $x$  轴方向上取 3 点,即  $G(m-1, n)$ ,  $G(m, n)$ ,  $G(m+1, n)$ , 以这 3 点的梯度幅值作为函数值,为  $m-1$ ,  $m$ ,  $m+1$  插值基点,代入二次多项式插值函数  $\varphi(x)$ , 令  $\frac{d\varphi(x)}{dx} = 0$ 。同理,在  $y$  轴方向上取 3 点  $G(m, n-1)$ ,  $G(m, n)$ ,  $G(m, n+1)$  进行相同操作,经推导得出亚像素边缘坐标  $(X_e, Y_e)$ <sup>[6]</sup>。

$$\varphi(x) = \sum_{i=0}^2 \prod_{j=0, j \neq i}^2 \frac{x - x_i}{x_i - x_j} y_i \quad (5)$$

式中:  $x_i$  为插值基点;  $y_i$  为函数值。经二次插值后得到的亚像素边缘坐标为:

$$\begin{cases} X_e = m + \frac{G(m-1, n) - G(m+1, n)}{2[G(m-1, n) - 2G(m, n) + G(m+1, n)]} \\ Y_e = n + \frac{G(m, n-1) - G(m, n+1)}{2[G(m, n-1) - 2G(m, n) + G(m, n+1)]} \end{cases} \quad (6)$$

## 2 光强变化对图像灰度的影响

为研究背光源光强变化对图像灰度的影响,使用直径为 1~8 mm 的标准轴在外界环境光强为 0 的条件下进行实验。首先,根据照度计读数通过调节光源旋钮控制背光源光强,将照度计读数从 6.5 开始以 2.5 为步长依次调节背光源光强。然后,分别获取不同光强下的标准轴部分图像及局部区域图像。3 mm 标准轴局部区域位置大小为 40×50,且定义最左侧一列像素为第 1 列,最上部一行像素为第 1 行。计算不同光强下局部区域内每一列像素的灰度均值,结果见图 1。最后,分别计算不同光强下的区域平均灰度。

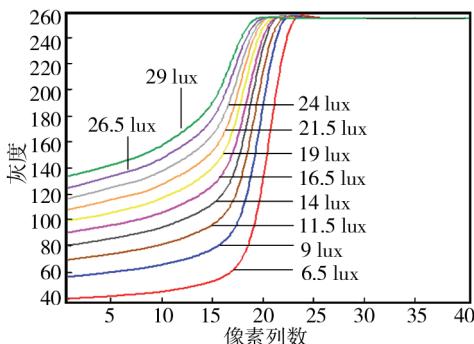


图 1 不同光强下局部区域灰度变化

Fig.1 Local region gray scale change under different light intensities

由图 1 中标准轴局部区域在不同光强下的灰度值分布可以看出, 不同光强下, 局部区域图像的灰度发生明显变化。随着光强的增强, 灰度值不断增大, 但是整体变化趋势相同。根据边缘与像素灰度值变化的关系, 可以判断边缘位置大致出现在区域的第 15~23 列内。

由不同光强下局部区域平均灰度可以看出, 随着光强的逐渐增强, 区域平均灰度逐渐变大, 当光强增加到照度计读数为 30 时, 区域平均灰度为 223.36。由于区域平均灰度随光强的变化规律会因最初选定的局部区域位置和大小而发生变化, 所以该图仅直观表达光强变化对区域平均灰度的影响, 而不研究其具体函数关系。

### 3 光强变化对亚像素边缘位置的影响

#### 3.1 梯度幅值

由于常用的亚像素边缘检测算法通常根据图像像素点的梯度进行边缘检测, 所以获取的边缘位置与边缘位置周围像素的梯度变化有关<sup>[7]</sup>。为研究光强变化对亚像素边缘位置的影响, 对不同光强下局部区域像素点的梯度幅值变化规律进行研究。首先以边缘位置周围的局部区域(区域位置和大小同上)作为研究对象, 分别测得不同光强下局部区域内每个像素点的梯度幅值。然后计算每一列 15 个像素点的梯度幅值平均值, 分析不同光强下局部区域从第 1 列到第 40 列的梯度幅值平均值变化规律。

不同光强下梯度幅值变化见图 2, 可以看出, 不同光强下, 局部区域各列梯度变化趋势基本相同; 随着光强的逐渐增强, 曲线整体逐渐向区域内部移动, 曲线变化逐渐放缓, 说明每列像素之间的梯度幅值差距减小, 梯度幅值最值依次减小, 说明每列像素之间的灰度值差距减小; 不同光强下, 梯度幅值变化范围不同。由图 2 的对比可知, 不同方法得到的梯度幅值变化趋势基本相同; 相同光强下, 不同方法得到的梯度幅值最值出现的位置基本一致。由于计算方法不

同, 梯度幅值变化范围不同, 因此使用动态调整上下阈值的方法进行边缘位置的调整以补偿光强变化造成的边缘位置变化难度较大<sup>[8]</sup>。

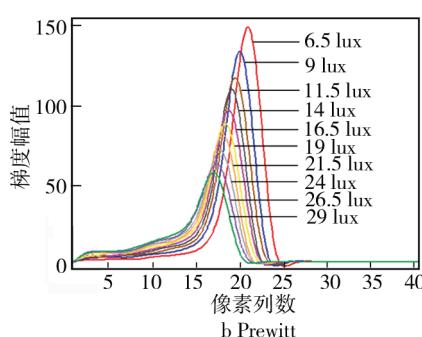
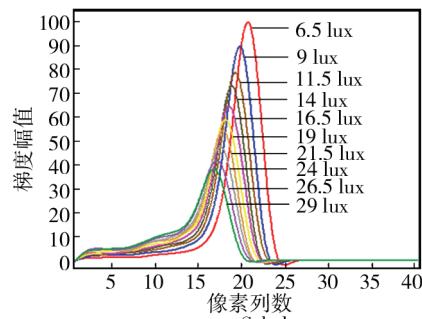


图 2 不同光强下梯度幅值变化

Fig.2 Gradient amplitude variation under different light intensities

#### 3.2 边缘位置

根据前文提到的边缘提取算法原理可知, 亚像素级边缘位置与像素点的梯度幅值有关, 且检测到的边缘位置与设定的上下检测阈值有很大的关系<sup>[9]</sup>。不同光强下的亚像素级边缘位置见图 3, 可以看出, 随着光强的逐渐增强, 亚像素级边缘位置逐渐向区域内部移动, 且变化趋势放缓; 亚像素级边缘位置与图 2 中梯度幅值最值出现的位置基本一致, 因此验证了边缘位置与像素的梯度幅值有关。

为研究光强与亚像素级边缘位置的关系, 利用函

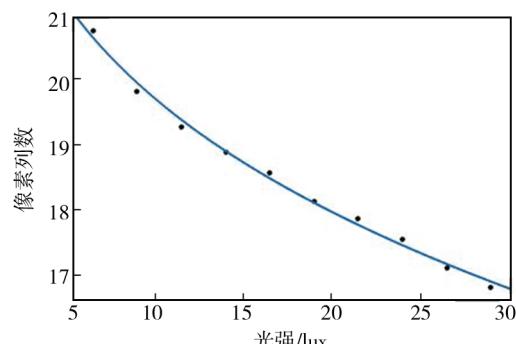


图 3 不同光强下的亚像素级边缘位置  
Fig.3 Sub-pixel edge position with different light intensities

数  $y = ax^b + c$  进行拟合，得到如下拟合函数：

$$Y = -4.879X^{0.2577} + 28.53$$

式中：X 为照度计读数；Y 为边缘位置坐标<sup>[10]</sup>。

## 4 自适应光强变化的动态边缘提取方法

### 4.1 方法

以照度计读数为 6.5 时的亚像素级边缘位置  $Y_0$  为基准位置，为减小由光强变化造成的边缘位置变化所引起的测量误差，采用自适应光强变化的动态边缘位置提取方法进行补偿<sup>[11]</sup>，补偿量为：

$\Delta l = -(Y - Y_0) = 4.879X^{0.2577} - 7.9035$ 。自适应光强变化的动态边缘位置提取方法见图 4，其步骤如下所述。

1) 提取某光强下的 Sobel 亚像素边缘，并获取所有边缘点坐标  $(m_i, n_i)$ 。

2) 采用中心差分法计算各个边缘点的法线方向。当  $n_{i-1} \neq n_{i+1}$  时， $\theta = \arctan\left(-\frac{m_{i+1} - m_{i-1}}{n_{i+1} - n_{i-1}}\right)$ ， $\theta \in (-\pi/2, \pi/2)$ ；当  $n_{i-1} = n_{i+1}$  时， $\theta = \pm\pi/2$ 。其中第一个边缘点采用向后差分，最后 1 个边缘点采用向前差分。

3) 沿法线方向向背景一侧补偿  $\Delta l$ ，得到补偿后的边缘点坐标  $(m'_i, n'_i)$ <sup>[12]</sup>： $\begin{cases} m'_i = m_i + \Delta l \cos \theta \\ n'_i = n_i + \Delta l \sin \theta \end{cases}$

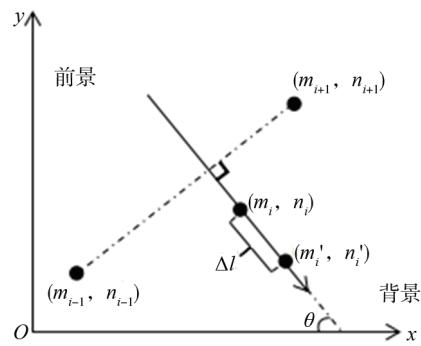


图 4 自适应光强变化的动态边缘提取方法  
Fig.4 Dynamic edge extraction method based on adaptive light intensity change

### 4.2 实验验证

经实验标定，文中所用视觉测量系统的像素当量为每像素  $4.26 \mu\text{m}$ 。为验证上述提出的自适应光强变化的动态边缘位置提取方法能否有效补偿由视觉测量系统背光源光强变化引起的边缘位置变化，并减小测量误差，用直径为  $1\sim8 \text{ mm}$  的 8 种标准轴进行实验验证，结果见表 1。首先在光强为  $6\sim30 \text{ lux}$  的区间内，分别测量 8 种标准轴的直径像素值 10 次，并取平均值作为各标准轴的补偿前测量值；然后在光强为  $6\sim30 \text{ lux}$  的区间内，利用文中提出的自适应光强变化的边缘位置提取方法分别测量 8 种标准轴的直径像素值 10 次，并取其平均值作为各标准轴的补偿后测量值。

表 1 8 种标准轴直径测量结果  
Tab.1 Diameter measurement result of eight kinds of standard shafts

光源强度/lux	类别	各标准轴的直径								平均误差
		1 mm	2 mm	3 mm	4 mm	5 mm	6 mm	7 mm	8 mm	
6.5	补偿前	234.59	469.19	703.87	938.45	1173.31	1407.92	1642.53	1877.30	0.00
	补偿后	234.59	469.19	703.87	938.45	1173.31	1407.92	1642.53	1877.30	0.00
9	补偿前	232.68	467.41	702.00	936.47	1171.51	1406.01	1640.64	1875.62	1.85
	补偿后	234.17	468.79	703.23	937.94	1172.92	1407.49	1642.01	1876.85	0.47
11.5	补偿前	231.51	466.20	700.97	935.44	1170.41	1404.94	1639.67	1874.42	2.95
	补偿后	234.13	468.78	703.48	937.96	1172.87	1407.45	1642.11	1876.94	0.43
14	补偿前	230.86	465.43	700.24	934.69	1169.61	1404.17	1638.76	1873.64	3.72
	补偿后	234.31	468.98	703.62	938.25	1173.01	1407.64	1642.31	1877.03	0.25
16.5	补偿前	230.23	464.89	699.51	934.11	1168.97	1403.62	1638.24	1872.95	4.33
	补偿后	234.54	469.17	703.83	938.42	1173.25	1407.87	1642.51	1877.25	0.04
19	补偿前	229.38	463.99	698.68	933.27	1168.08	1402.72	1637.31	1872.14	5.20
	补偿后	234.41	469.04	703.78	938.21	1173.13	1407.76	1642.36	1877.11	0.17
21.5	补偿前	228.89	463.41	698.13	932.74	1167.53	1402.19	1636.79	1871.54	5.74
	补偿后	234.54	469.18	703.84	938.43	1173.25	1407.88	1642.55	1877.25	0.03
24	补偿前	228.18	462.86	697.60	932.01	1166.92	1401.57	1636.15	1870.91	6.37
	补偿后	234.52	469.17	703.82	938.41	1173.26	1407.89	1642.49	1877.28	0.04
26.5	补偿前	227.35	461.95	696.66	931.24	1166.07	1400.68	1635.31	1870.06	7.23
	补偿后	234.25	468.89	703.53	938.13	1172.96	1407.58	1642.21	1876.97	0.33
29	补偿前	226.74	461.35	696.05	930.62	1165.46	1400.06	1634.68	1869.48	7.84
	补偿后	234.17	468.76	703.49	938.05	1172.91	1407.49	1642.13	1876.88	0.41

由表1可以看出,在光强为6~30 lux区间内,随着背光源强度的增强,8种标准轴直径测量值逐渐减小,误差逐渐增大,且误差变化规律基本一致,最大误差达到8.5像素,即36.22 μm。利用文中提出的自适应光强变化的动态边缘位置提取方法,对光强为6~30 lux范围内的8种标准轴直径进行测量,从补偿结果可以看出,经该方法补偿后的8种标准轴直径测量误差在1个像素之内,说明该方法能够有效减小和补偿由光源强度变化造成的边缘位置移动及系统的测量误差<sup>[13—15]</sup>。

## 5 结语

视觉测量技术以其高精度和实时性好等特点被广泛应用于包装工程、产品检测及尺寸测量等领域,视觉测量系统在进行二维尺寸测量时主要采用LED背光源作为照明条件。这里首先从理论上分析了图像灰度与像元面接收到的光照强度之间的关系,利用实验分析了光源强度对图像梯度和边缘位置的影响,随着光源强度的不断增强,图像灰度及梯度幅值发生变化且边缘位置逐渐内缩。根据图像梯度幅值及边缘位置的变化规律,提出了一种自适应光强变化的动态边缘位置提取方法,对由光强变化造成的边缘位置移动进行补偿,得到补偿后的边缘坐标。最后通过实验证该方法的有效性,实验结果表明,该方法能够有效地减小和补偿由光源强度变化造成的边缘位置移动及系统的测量误差,8种标准轴直径测量误差可减小到1个像素(4.26 μm)以内。

## 参考文献:

- [1] 宋国庆,吴育民,冯云鹏,等.机器视觉在光学加工检测中的应用[J].影像科学与光化学,2016,34(1):30—35.  
SONG Guo-qing, WU Yu-min, FENG Yun-peng, et al. Application of Machine Vision in Optical Processing [J]. Journal of Image Science and Photochemistry, 2016, 34(1): 30—35.
- [2] 李旭.自适应光强变化的齿轮视觉测量技术研究[D].太原:中北大学,2016.  
LI Xu. Research on Gear Vision Measurement Based on Adaptive Light Intensity[D]. Taiyuan: North University of China, 2016.
- [3] 罗子明,方素平,周海明,等.影像测量中的光源自适应控制系统研究[J].制造技术与机床,2008(10):140—144.  
LUO Zi-ming, FANG Su-ping, ZHOU Hai-ming, et al. Research on Adaptive Control System of Light Sources in Image Measurement[J]. Manufacturing Technology and Machine Tools, 2008(10): 140—144.
- [4] 秦莉,董丽丽,许文海,等.CCD图像灰度与照度的转换标定方法[J].仪器仪表学报,2015,36(3):639—644.  
QIN Li, DONG Li-li, XU Wen-hai, et al. Method for Conversion Calibration between CCD Image Gray Value and Illumination[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2015, 36(3): 639—644.
- [5] 田原嫄,谭庆昌,张海波,等.亚像素边缘定位算法的稳定性分析[J].计算机工程,2010,36(7):211—213.  
TIAN Yuan-yuan, TAN Qing-chang, ZHANG Hai-bo, et al. Stability Analysis of Sub-pixel Edge Location Algorithm[J]. Computer Engineering, 2010, 36(7): 211—213.
- [6] 龚聪,徐杜.光源强度变化对图像检测精度的影响及其解决方法[J].科学技术与工程,2014,14(13):236—239.  
GONG Cong, XU Du. Influence of Intensity Change of Light Source on Image Detection Accuracy and Its Solution[J]. Science Technology and Engineering, 2014, 14(13): 236—239.
- [7] XU Q, VARADARAJAN S, CHAKRABARTI C, et al. A Distributed Canny Edge Detector Algorithm and FPGA Implementation[J]. Image Processing IEEE Transactions on, 2014, 23(7): 2944—2960.
- [8] 景敏.短小零件直线度误差的高精度测量方法[J].科学技术与工程,2014,14(33):207—209.  
JING Min. High Precision Measurement Method for Straightness Error of Short Parts[J]. Science Technology and Engineering, 2014, 14(33): 27—29.
- [9] 赵文辉,赵萍,段振云,等.微米级机器视觉系统中随机误差与系统误差的研究[J].组合机床与自动化加工技术,2013(9):108—110.  
ZHAO Wen-hui, ZHAO Ping, DUAN Zhen-yun, et al. Study of Random Errors and System Errors in Micron Machine Vision Systems[J]. Machine Tools and Automatic Machining Technology, 2013(9): 108—110.
- [10] FERNANDEZ L, AZZOPARDI G, ALEGRE E, et al. Machine Vision Based Identification of Broken Inserts in Edge Profile Milling Heads[J]. Robotics and Computer Integrated Manufacturing, 2017, 44: 276—283.
- [11] XIAO H, LI M, GAO X, et al. Design and Implementation of High Power LED Machine Vision Lighting System[C]// SPIE/COS Photonics Asia, 2014.
- [12] SUN H. Error Measurement Method for Rotation Axes of Five-axis Machine Tool Based on Machine Vision [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(8): 293—298.
- [13] LAI X J, XU W D, ZHAO C Q, et al. Influence of Sample Defocus and Large Thickness on Measurement Error in Machine Vision Application[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(8): 2—9.
- [14] 陈旭,林国余.一种基于机器视觉的车辆轨迹测量方法[J].光电工程,2016,43(12):133—141.  
CHEN Xu, LIN Guo-yu. A Method of Vehicle Track Measurement Based on Machine Vision[J]. Opto-Electronic Engineering, 2016, 43(12): 133—141.
- [15] KUMAR B M, RATNAM M M. Machine Vision Method for Non-contact Measurement of Surface Roughness of a Rotating Workpiece[J]. Sensor Review, 2015, 35(1): 10—19.