

· 自动化技术 ·

基于改进Zernike矩的玻璃瓶亚像素边缘检测算法

杨浩, 裴蕾, 李昌顺, 杨梅

(重庆大学输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室 重庆 沙坪坝区 400044)

【摘要】 图像的边缘检测精度决定了实际尺寸的测量精度, 为了提高测量精度, 提出了一种基于改进的Zernike矩的测量玻璃瓶实际尺寸的算法。将传统的Zernike矩算法与Otsu自适应阈值法相结合, 得到改进的快速算法; 利用该快速算法对采集的玻璃瓶图像进行亚像素级边缘检测; 运用最小二乘法根据亚像素坐标对瓶口与瓶底所形成的椭圆进行拟合; 应用标准块规对系统进行标定并得到玻璃瓶实际的测量尺寸。实验结果表明, 该方法不仅可使边缘检测达到亚像素级精度, 还避免了人工反复选择阈值而造成的低效率与误判, 实现了快速、准确、无接触测量实际尺寸的功能。

关键词 标定; 最小二乘拟合; Otsu自适应阈值法; 亚像素; Zernike矩

中图分类号 TP391

文献标识码 A

doi:10.3969/j.issn.1001-0548.2012.06.011

Improved Zernike Moment-Based Method for Subpixel Edge Detection of the Glass Bottle

YANG Hao, PEI Lei, LI CHANG-shun, and YANG Mei

(State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Safety & New Technology, Chongqing University Shapingba Chongqing 400044)

Abstract As the accuracy of edge detection determines the accuracy of actual size measurement, in order to improve the measuring accuracy, this paper proposes that a faster algorithm should be adopted to detect the glass bottle dimension based on the Zernike moments. The traditional Zernike algorithm is combined with Otsu adaptive threshold algorithm to get a faster improved algorithm. The edge of glass bottle with subpixel level is detected by using the improved algorithm. The ellipses formed by the glass bottle's mouth and bottom are fitted by applying the least square method. At last, the system is calibrated by gauge block to get the actual measuring dimension. Experimental results show that the improved algorithm can not only make the edge detection reach the subpixel accuracy, but also avoid the edge misidentification and inefficient which will be caused by repeatedly manual adjustments to select the threshold value when we detect the edge.

Key words calibration; least square fitting; Otsu adaptive threshold method; subpixel; Zernike moment

目前, 我国对玻璃瓶检测采用的验瓶方式大致分为3种: 人工灯光验瓶、基于传感技术的验瓶机以及基于机器视觉的无接触验瓶机。国内玻璃瓶生产厂家大多采用人工灯光验瓶的方法, 由于人眼容易疲劳且具有不稳定性, 随着流水线速度的提升, 人眼检测在精度、速度上的限制更加明显。若继续依靠人工验瓶, 不仅会增加人工成本和管理成本, 同时也无法保证检测的合格率。随着计算机软件、硬件的发展, 数字图像处理的理论和方法不断完善, 利用机器视觉的方法进行无接触的产品质量自动检测技术已逐渐变得切实可行, 并且这种方法具有检测设备成本低、机器设备要求低、检测精度高和灵

活性高等优点^[1-4]。

利用机器视觉的方法进行无接触测量时, 实际尺寸的精度以检测出的图像边缘精度为基础, 所以图像边缘检测技术的研究具有重要意义。目前常用的检测方法都是以图像像素为单位进行处理的, 考察图像像素邻域内灰度的变化, 利用一阶或二阶导数算子检测边缘, 如Roberts算子、Prewitt算子、Sobel算子、Laplacian算子和Canny算子^[5-6]。

对于精度要求较高的工业生产, 像素级的边缘检测算法已经无法满足实际需要, 越来越多的专家致力于亚像素级算法的研究^[7]。在这类算法中应用最广泛的是利用矩的原理来进行边缘检测。文献^[8]

收稿日期: 2011-05-10; 修回日期: 2011-07-06

基金项目: 输配电装备安全国家重点实验室项目(1010102020090116)

作者简介: 杨浩(1960-), 男, 博士, 教授, 主要从事机器视觉、图像处理、电力系统信号处理方面的研究。

提出了用空间矩来检测边缘,利用6个空间矩来计算模型的4个参数,计算量较大。文献[9]提出了利用Zernike正交矩来进行边缘检测,该算法只需要3个Zernike矩就可计算出4个参数,计算速度较快。但传统的Zernike矩算子在判断边缘时需要人工反复调节选择阈值,不仅效率不高,还极易误判影响检测精度。近年来,人们提出了很多改进的Zernike矩边缘检测算法,有的将算法本身加以完善,如提高卷积模板的尺寸,改进部分边缘判据^[10-11];有的将其他算法与Zernike矩有效结合,如利用形态学与小波算法^[12-13],使得基于Zernike矩的边缘检测算法应用范围日趋广泛^[14-15]。这些改进的算法仍存在部分缺陷,如提高卷积模板的尺寸虽然能够提高检测精度,但延长了检测时间;若与其他算法相结合,会增加计算的复杂程度。本文提出一种将传统Zernike矩和计算简单的Otsu法相结合的快速算法,能在图像处理过程中直接得到最优阶跃灰度阈值,并对采集到的玻璃瓶图像进行亚像素级别的边缘检测,避免了人为因素的影响,提高了检测速度。通过对瓶口与瓶底所形成的椭圆进行最小二乘拟合,利用块规进行标定得到测量的实际尺寸。

1 Zernike矩亚像素边缘检测

1.1 Zernike矩定义

图像 $f(x, y)$ 的 n 阶 m 次Zernike矩定义为^[9]:

$$A_{nm} = \frac{n+1}{\pi} \iint_{x^2+y^2 \leq 1} f(x, y) V_{nm}^*(\rho, \theta) dx dy \quad (1)$$

式中, $V_{nm}(\rho, \theta)$ 是积分核函数,表示为 $V_{nm}(\rho, \theta) = R_{nm}(\rho) e^{jm\theta}$, 其中, m, n 都为整数并满足 $n \geq 0$, $n - |m|$ 为偶数且 $n \geq |m|$, $R_{nm}(\rho)$ 定义为:

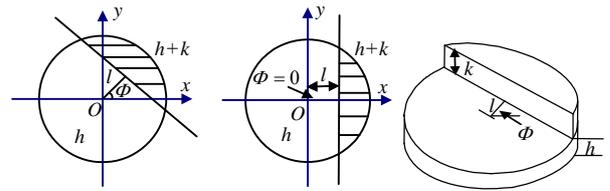
$$R_{nm}(\rho) = \sum_{s=0}^{(n-|m|)/2} \frac{(-1)^s (n-s)! \rho^{n-2s}}{s! \left(\frac{n+|m|}{2} - s\right)! \left(\frac{n-|m|}{2} - s\right)!} \quad (2)$$

Zernike矩的一个重要性质是旋转不变性。若图像旋转 ϕ 角,则原图的Zernike矩与旋转后图像的Zernike矩的关系为 $A_{nm}' = A_{nm} e^{-jm\phi}$, 即旋转后的Zernike矩只有相角发生了变化,幅值仍保持不变。

1.2 Zernike矩亚像素边缘检测原理

假设单位圆的圆心位于图像的某个像素点上,并且边缘正好经过该圆,由此建立理想的阶跃边缘模型,如图1a所示。图中, k 是阶跃灰度, h 是背景灰度,则阴影部分的灰度值为 $h+k$, l 是圆心到边缘的垂直距离, ϕ 是边缘垂线与 x 轴的夹角。将图像顺时针旋转 ϕ 角度,使边缘平行于 y 轴,如图1b

所示。二维理想阶跃边缘模型如子图1c所示。



a. 理想阶跃边缘 b. 旋转后的理想阶跃边缘 c. 二维理想阶跃边缘模型

图1 边缘模型

由旋转后的图像可得 $\iint_{x^2+y^2 \leq 1} f'(x, y) y dy dx = 0$, 其中 $f'(x, y)$ 为旋转后的边缘函数。由于该式就是 A_{11}' 的虚部,所以存在以下关系:

$$\text{Im}[A_{11}'] = \sin(\phi) \text{Re}[A_{11}] - \cos(\phi) \text{Im}[A_{11}] = 0 \quad (3)$$

即可求得图像旋转角度 $\phi = \tan^{-1} \left(\frac{\text{Im}[A_{11}]}{\text{Re}[A_{11}]} \right)$ 。

由式(2)得积分核函数 $V_{00} = 1$, $V_{11} = x + jy$, $V_{20} = 2x^2 + 2y^2 - 1$, 且旋转前后图形的Zernike矩关系为 $A_{00}' = A_{00}$, $A_{11}' = A_{11} e^{j\phi}$, $A_{20}' = A_{20}$ 。结合图1c,可以推导出旋转后图像的各阶Zernike矩为:

$$A_{00}' = \int_{-1}^1 \int_{-\sqrt{1-x^2}}^{\sqrt{1-x^2}} h dy dx + \int_l^1 \int_{-\sqrt{1-x^2}}^{\sqrt{1-x^2}} k dy dx = h\pi + \frac{k}{2} \pi - k \sin^{-1}(l) - kl\sqrt{1-l^2} \quad (4)$$

$$A_{11}' = \int_{-1}^1 \int_{-\sqrt{1-x^2}}^{\sqrt{1-x^2}} h(x-iy) dy dx + \int_l^1 \int_{-\sqrt{1-x^2}}^{\sqrt{1-x^2}} k(x-iy) dy dx = \frac{2k}{3} (1-l^2)^{\frac{3}{2}} \quad (5)$$

$$A_{20}' = \int_{-1}^1 \int_{-\sqrt{1-x^2}}^{\sqrt{1-x^2}} h(2x^2 + 2y^2 - 1) dy dx + \int_l^1 \int_{-\sqrt{1-x^2}}^{\sqrt{1-x^2}} k(2x^2 + 2y^2 - 1) dy dx = \frac{2k}{3} l(1-l^2)^{\frac{3}{2}} \quad (6)$$

根据式(4)~式(6)可解得参数 l 、 k 和 h 分别为:

$$l = \frac{A_{20}'}{A_{11}'}, \quad k = \frac{3A_{11}'}{2(1-l^2)^{\frac{3}{2}}} \quad (7)$$

$$h = \frac{A_{00}' - \frac{k\pi}{2} + k \sin^{-1}(l) + kl\sqrt{1-l^2}}{\pi}$$

假设在边缘检测过程中采用的模板大小为 $N \times N$, 结合其放大效应的修正,可以得到利用Zernike矩进行亚像素边缘检测的计算公式为:

$$\begin{bmatrix} x_s \\ y_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} + \frac{Nl}{2} \begin{bmatrix} \cos(\phi) \\ \sin(\phi) \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中, (x_s, y_s) 是边缘的亚像素坐标值; (x, y) 是图1a中的原点坐标值^[16]。

2 Otsu自适应阈值法原理

Otsu法^[17]也称大津阈值法或最大类间方差法, 是一种在判决分析最小二乘法原理的基础上推导得出的全局自适应非参数无监督阈值选取算法。

设图像的像素点数为 N , 图像灰度范围为 $\{0, 1, \dots, L-1\}$, 其中灰度级为 i 的像素点个数为 n_i , 则灰度 i 出现的概率 $P_i = n_i / N$, 设阈值 t 按灰度将图像划分为 C_0 和 C_1 两类, 出现概率分别为:

$$\omega_0 = \sum_{i=0}^t P_i, \quad \omega_1 = \sum_{i=t+1}^{L-1} P_i$$

设 $\mu_T = \sum_{i=0}^{L-1} iP_i$ 表示整幅图像的平均灰度, 则 C_0

和 C_1 类的均值分别为 $\mu_0 = \sum_{i=0}^t iP_i / \omega_0$ 和 $\mu_1 =$

$\sum_{i=t+1}^{L-1} iP_i / \omega_1$ 。 C_0 和 C_1 类的类间方差为:

$$\sigma_B^2 = \omega_0(\mu_0 - \mu_T)^2 + \omega_1(\mu_1 - \mu_T)^2 = \omega_0\omega_1(\mu_1 - \mu_0)^2 \quad (9)$$

由以上分析可知, 当目标和背景之间的类间方差达到最大时, 它们的差别也达到最大, 任何错分情况都会导致类间方差变小, 说明此时的图像分割效果最好, 所以在该时刻取得的 T 为最佳阈值, 即

$$\sigma_B^2(T) = \sum_{0 \leq t \leq L-1} \text{Max} \{ \sigma_B^2(t) \}。$$

3 改进的快速算法

传统的Zernike算法的判定依据为: $k \geq \tau \cap l \leq \delta$ 。由于 2δ 必须小于一个像素的长度, 因此 δ 较易选择。而阶跃灰度 k 的范围较广, τ 作为自由选择的阈值对边缘判断结果有着极大的影响。若 τ 值选取过小, 检测结果会出现较多伪边缘; 若 τ 值选取过大, 在减少伪边缘的同时也会丢失图像的真实边缘。必须要反复调整 τ 值才能使检测结果较好, 不仅效率较低, 延长了检测时间, 而且也无法保证检测的精度。

在一幅图像的背景中任取一像素点 p , 分析该点的灰度值与其8邻域像素的灰度值。当 p 点远离目标时, 这9个数值的变化较为平缓, 则各点生成的阶跃灰度值之间的差别也较小, 变化趋势也同样较为平缓; 当 p 点位于边界时, 目标和背景交界处两边的像素点的灰度值会产生跳变, 导致阶跃灰度值也产生较大的变化。 p 点取为目标部分像素点时的情况相同。由此可知, 图像的灰度值与阶跃灰度值在同一像素点具有相同的变化趋势, 同样可以利用

Otsu法的原理计算目标和背景基于阶跃灰度的最大类间方差, 从而得到最优的阶跃灰度阈值 τ 。

具体算法步骤如下: 1) 将模板与图像卷积计算 A_{00} 、 A_{11} 和 A_{20} 矩; 2) 计算旋转角度 ϕ ; 3) 根据旋转不变性计算 A_{00}' 、 A_{11}' 和 A_{20}' 矩; 4) 根据式(7)计算出 l 和 k ; 5) 将 k 取绝对值后作为计算对象, 根据式(9)计算目标和背景基于阶跃灰度的最大类间方差, 得到最优的阶跃灰度阈值 τ ; 6) 如果像素点满足条件 $k \geq \tau \cap l \leq \delta$, 则该像素点为边缘点, 根据式(8)计算出亚像素边缘点坐标。

4 最小二乘法拟合椭圆

利用改进的Zernike矩法对玻璃瓶进行边缘检测后, 可分别得到瓶口与瓶底的椭圆形边缘。利用最小二乘法对这两个椭圆进行拟合, 即可求得椭圆的各个参数^[18-19]。

在二维坐标平面坐标系中, 可利用圆锥曲线方程的代数形式来表示椭圆, 将常数项归一化为1的椭圆方程为 $Ax^2 + Bxy + Cy^2 + Dx + Ey + 1 = 0$ 。也可以用平面坐标系的几何参数表示椭圆, 即椭圆的中心位置 (x_0_in, y_0_in) , 半长轴 a 和半短轴 b , 长轴的倾角 θ , 各个参数的意义如图2所示。

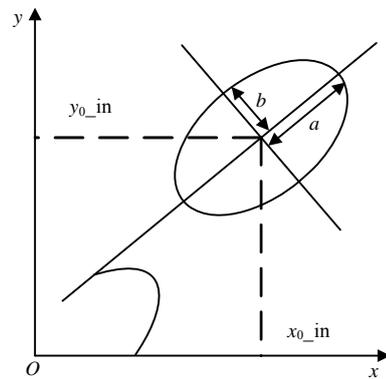


图2 二维平面椭圆

设椭圆上若干个离散检测点可表示为 $P_i(x_i, y_i)$, 其中, $i=1, 2, \dots, N$, 设目标函数为:

$$F(A, B, C, D, E) =$$

$$\sum_{i=1}^N (Ax_i^2 + Bx_i y_i + Cy_i^2 + Dx_i + Ey_i + 1)^2 \quad (10)$$

为使式(10)最小, 根据极值原理, 存在以下等式:

$$\frac{\partial F}{\partial A} = \frac{\partial F}{\partial B} = \frac{\partial F}{\partial C} = \frac{\partial F}{\partial D} = \frac{\partial F}{\partial E} = 0 \quad (11)$$

由此可得到一组线性方程组, 进而导出椭圆各个参数值。

椭圆的中心位置 (x_0_in, y_0_in) , 半长轴 a 可分别表示为:

$$x_{0_in} = \frac{BE - 2CD}{4AC - B^2}, \quad y_{0_in} = \frac{BD - 2AE}{4AC - B^2} \quad (12)$$

$$a = \sqrt{\frac{2(Ax_c^2 + Cy_c^2 + Bx_c y_c - 1)}{A + C - \sqrt{(A - C)^2 + B^2}}} \quad (13)$$

5 摄像机标定

用摄像机采集图像时，边缘信息会以像素为单位转换成数字信号。因此要得到物体的实际尺寸，就必须建立图像像素与实际尺寸的对对应关系，本文采用标准件法来确定上述关系。

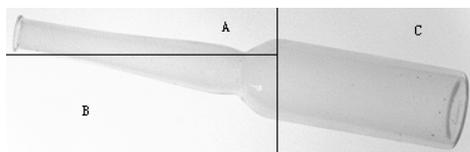
首先选择畸变小的光学镜头(远心镜头或大焦距镜头)，将标准块规置于被测玻璃瓶所处位置，设置相同的测量物距与照明条件，采集块规图像，即把标准件的精确尺寸传递给数字图像。标准块规的尺寸为经过测量的标准值，因此可以通过确定块规在图像中所代表的像素数 n 与相应的实际尺寸 a 之间的关系得到标定系数 K ，即 $K = a/n$ 。其中， a 的单位为mm， n 的单位为pixel， K 的单位为mm/pixel。

6 玻璃瓶测量实验

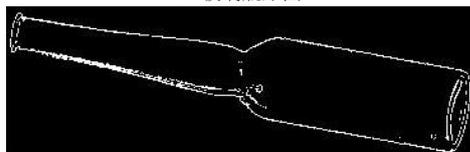
本文采用型号为MV-3000FC的摄像机，该款摄像机是一款高性能工业检测专用CCD工业数字相机。选用块规长度为35 mm。采用相同的测量物距与照明条件。为了提高计算速度，将采集的图像中包含目标物体的部分图像截取出来，并缩小至原图的1/4。

6.1 采集图像并进行边缘检测

将玻璃瓶置于工作台上，利用摄像机采集图像，如图3a所示。根据图像中光线的明暗程度，将图像划分为3部分，利用改进的Zernike矩方法计算出3个阶跃灰度阈值，边缘检测效果如图3b所示。其中， $\delta = 0.22$ ，区域A、B、C的阶跃灰度阈值分别为 $\tau_A = 13.9999$ ， $\tau_B = 6.999895$ ， $\tau_C = 15.0000$ 。



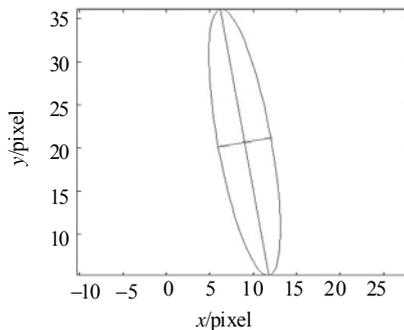
a. 玻璃瓶原图



b. 边缘检测效果

图3 玻璃瓶处理图

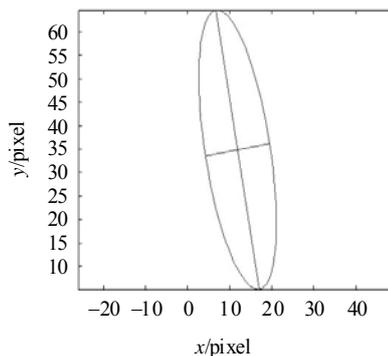
6.2 最小二乘法拟合椭圆



a. 瓶口椭圆拟合

Field	Value
a	3.0683
b	15.722
phi	-0.17833
X0	12.521
Y0	18.733
X0_in	8.9998
Y0_in	20.657
long_axis	31.443
short_axis	6.1367

b. 瓶口椭圆参数



c. 瓶底椭圆拟合

Field	Value
a	7.7441
b	30.219
phi	-0.17122
X0	17.652
Y0	32.336
X0_in	11.884
Y0_in	34.871
long_axis	60.438
short_axis	15.488

d. 瓶底椭圆参数

图4 拟合结果图

为了测量出瓶口与瓶底的直径，需要对形成的椭圆进行最小二乘拟合。在数字图像中，原点位于图像的左上角， x 轴方向向右， y 轴方向向下。所以在进行椭圆拟合时，需要将原图的坐标方向改变至与图2相同，即将原图关于 x 轴做镜面对称处理。截取玻璃瓶口与瓶底部分的椭圆图像，分别进行最

小二乘拟合, 拟合结果如图4所示。其中, 图4a和图4c的横坐标为拟合椭圆水平方向像素数, 纵坐标为拟合椭圆数值方向像素数, (x_0_in, y_0_in) 为椭圆在当前坐标系的中心坐标, $long_axis$ 为椭圆长轴长度。

6.3 摄像机标定及尺寸测量

选择长度为35 mm的块规, 在相同的测量物距与照明条件下, 放置在工作台相同的位置上采集图像, 处理结果如图5所示。

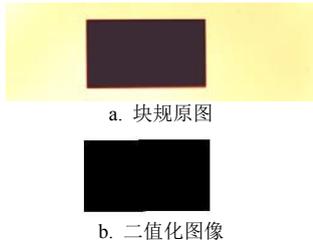


图5 块规处理图

计算图5b中两条竖直边缘之间的距离即可得到在数字图像中块规长度所占的像素数 n , 相应的实际尺寸 a 为35 mm, 由此可利用 $K = a/n$ 来确定标定系数 K 。对同一块规重复调焦, 取平均值为最后使用的标定系数。

最后标定系数取为 $K = 0.248\ 2\ \text{mm/pixel}$ 。

由最小二乘拟合结果及图4b可得瓶口椭圆的长轴长度为31.443 4 pixel, 根据标定系数可计算出瓶口的实际直径为:

$$D_1 = 31.443\ 4 \times 0.248\ 2 = 7.804\ \text{mm}$$

由最小二乘拟合结果及图4d可得瓶底椭圆的长轴长度为60.437 8 pixel, 根据标定系数可计算出瓶底的实际直径为:

$$D_2 = 60.437\ 8 \times 0.248\ 2 = 15.000\ \text{mm}$$

由于瓶口和瓶底椭圆参数是将椭圆图像从原图中截取后计算得到, 所以将各个椭圆的中心坐标 (x_0_in, y_0_in) 还原至原图中, 可得图3中的实际坐标值。还原后的瓶口椭圆中心坐标为(8.999 8, 20.656 8), 瓶底椭圆中心坐标为(355.884 3, 82.871 3), 则瓶身长度的实际尺寸为:

$$L = \sqrt{(355.884\ 3 - 8.999\ 8)^2 - (82.871\ 3 - 20.656\ 8)^2} \times 0.248\ 2 = 87.470\ 5\ \text{mm}$$

综合以上数据, 可以得到利用改进的Zernike矩快速算法计算出的瓶口直径, 瓶底内径以及瓶身的长度, 将其与实际标准值对比, 如表1所示。

表1 玻璃瓶尺寸

	mm		
	计算值	实际值	误差
瓶口直径	7.804	7.8	0.004
瓶底内径	15	14.98	0.02
瓶身长度	87.470 5	87.5	-0.029 5

7 结 论

随着现代工业的发展, 像素级的图像处理精度已经不能满足实际生产的需要, 为了将边缘检测提高到亚像素精度, 本文提出了一种将传统的Zernike矩算法与Otsu自适应阈值法相结合的快速边缘检测方法, 该算法利用Otsu法的原理计算目标和背景基于阶跃灰度的最大类间方差, 可直接得到最优的阶跃灰度阈值 τ 进行边缘检测。利用最小二乘法拟合椭圆, 并标定得到玻璃瓶的实际尺寸。经实验证明, 改进后的快速算法得到的边缘较细, 轮廓清晰, 效率较高, 避免了由于人工盲目选择阈值而导致的误判, 提高了实际尺寸的测量精度。

参 考 文 献

- [1] 谭刚, 董祥龙, 徐继, 等. 基于机器视觉的玻璃瓶表面缺陷检测[J]. 上海工程技术大学学报, 2009, 3(2): 111-114.
TAN Gang, DONG Xiang-long, XU Ji. Defect detection of empty bottle surface based on machine-vision[J]. Journal of Shanghai University of Engineering Science, 2009, 3(2): 111-114.
- [2] 丁挺, 丁晓丹, 范洪达. 一种快速的玻璃瓶口裂纹检测算法[J]. 计算机测量与控制, 2007, 15(3): 323-325.
DING Ting, DING Xiao-dan, FAN Hong-da. Fast algorithm of crack detecting in glass bottle mouth[J]. Computer Measurement and Control, 2007, 15(3): 323-325.
- [3] 张利伟, 张航. 基于计算机视觉的玻璃瓶在线检测方法[J]. 计算机工程与科学, 2009, 31(10): 36-38.
ZHANG Li-wei, ZHANG Hang. A method of on-line glass bottle detection with computerized vision[J]. Computer Engineering and Science, 2009, 31(10): 36-38.
- [4] 高绍嵩, 范洪达, 魏宇. 基于机器视觉的玻璃瓶检测系统[J]. 海军航空工程学院学报, 2006, 21(2): 49-51.
GAO Shao-song, FAN Hong-da, WEI Yu. Glass bottle inspector system based on machine vision[J]. Journal of Naval Aeronautical Engineering Institute, 2006, 21(2): 49-51.
- [5] 章毓晋. 图象分割[M]. 北京: 科学出版社, 2001.
ZHANG Yu-jin. Image segmentation[M]. Beijing: Science Press, 2001.
- [6] CANNY J. A computational approach to edge detection[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1986, 8(6): 679-698.
- [7] JENSEN K, ANASTASSIOU D. Subpixel edge localization and the interpolation of still images[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 1995, 4(3): 285-295.
- [8] LYVERS E P, MITCHELL O R. Subpixel measurements using a moment-based edge operator[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1989, 11(12): 1293-1309.
- [9] GHOSAL S, MEHROTRA R. Orthogonal moment operators

- for subpixel edge detection[J]. *Pattern Recognition*, 1993, 26(2): 295-306.
- [10] 曲迎东, 李荣德, 白彦华, 等. 高速的 9×9 尺寸模板Zernike矩边缘算子[J]. *光电子·激光*, 2010, 21(11): 1683-1687.
QU Ying-dong, LI Rong-de, BAI Yan-hua. A high speed Zernike moments edge operator based on 9×9 masks [J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2010, 21(11): 1683-1687.
- [11] 高世一, 赵明扬, 张雷, 等. 基于Zernike正交矩的图像亚像素边缘检测算法改进[J]. *自动化学报*, 2008, 34(9): 1163-1168.
GAO Shi-yi, ZHAO Ming-yang, ZHANG Lei. Improved algorithm about subpixel edge detection of image based on Zernike orthogonal moments[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2008, 34(9): 1163-1168.
- [12] 魏本征, 赵志敏, 华晋. 基于改进形态学梯度和Zernike矩的亚像素边缘检测方法[J]. *仪器仪表学报*, 2010, 31(4): 838-844.
WEI Ben-zheng, ZHAO Zhi-min, HUA Jin. Sub-pixel edge detection method based on improved morphological gradient and Zernike moment[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2010, 31(4): 838-844.
- [13] 王俊文, 刘光杰, 张湛, 等. 基于小波变换和Zernike矩的图像区域复制篡改鲁棒取证[J]. *光学精密工程*, 2009, 17(7): 1686-1693.
WANG Jun-wen, LIU Guang-jie, ZHANG Zhan, et al. Robust forensics for image regional duplication and forgery based on DWT and Zernike moment[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2009, 17(7): 1686-1693.
- [14] 佟庆彬, 张晓冬, 丁振良, 等. 基于激光视觉的石英摆片厚度精密测量方法[J]. *仪器仪表学报*, 2010, 31(6): 1358-1363.
TONG Qing-bin, ZHANG Xiao-dong, DING Zhen-liang. Accurate measurement method for the thickness of quartz pendulous reed based on laser vision[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2010, 31(6): 1358-1363.
- [15] 张舞杰, 李迪, 叶峰. 基于视觉的贴片元件检测方法[J]. *华南理工大学学报(自然科学版)*, 2010, 38(1): 65-69.
ZHANG Wu-jie, LI Di, YE Feng. Vision-based inspection algorithm for chip components[J]. *Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition)*, 2010, 38(1): 65-69.
- [16] 李金泉, 王建伟, 陈善本, 等. 一种改进的Zernike正交矩亚像素边缘检测算法[J]. *光学技术*, 2003, 29(4): 500-503.
LI Jin-quan, WANG Jian-wei, CHEN Shan-ben, et al. Improved algorithm of subpixel edge detection using Zernike orthogonal moments[J]. *Optical Technique*, 2003, 29(4): 500-503.
- [17] OTSU N. A threshold selection method from gray-level histograms[J]. *IEEE Transactions on Systems-Man and Cybernetics*, 1979, 9(1):62-66.
- [18] 闫蓓, 王斌, 李媛. 基于最小二乘法的椭圆拟合改进算法[J]. *北京航空航天大学学报*, 2008, 34(3): 295-298.
YAN Bei, WANG Bin, LI Yuan. Optimal ellipse fitting method based on least-square principle[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2008, 34(3): 295-298.
- [19] 周磊. 椭圆拟合方法及其应用于土星光环的边缘[D]. 广州: 暨南大学, 2006.
ZHOU Lei. Application of ellipse fitting methods to the edge of Saturn's ring[D]. Guangzhou: Ji'nan University, 2006.

编辑 漆蓉