

基于视觉图像的二次曲线特征参数精密测量方法

佟庆彬

(北京交通大学电气工程学院 北京 100044)

摘 要: 为了满足视觉检测中对二次曲线参数(圆或椭圆)高精度测量要求,提出了一种基于视觉图像的二次曲线特征参数精密测量方法。该方法利用变结构元广义形态学边缘检测算法对图像中的二次曲线进行初始边缘定位,充分提取图像边缘细节信息的同时抑制图像噪声的影响。在亚像素图像处理中,基于 Zernike 矩边缘检测算法计算出的边缘参数,提出了对二次曲线特征进行亚像素边缘定位的边缘检测算法,建立了曲线边缘点与边缘参数之间的映射关系。利用检测出的二次曲线亚像素边缘点数据,通过定义的数据点分布优化的参数拟合算法,可以计算出二次曲线的特征参数。实验结果表明:该方法稳定性好且实时性强,定位不确定度优于 0.03 像素,可实现二次曲线特征参数的精密测量。

关键词: 视觉图像; 二次曲线; 变结构元; Zernike 矩; 保矩法; 拟合

中图分类号: TP391 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.4050

Accurate measurement method of quadratic curve parameters based on vision image

Tong Qingbin

(School of Electrical Engineering , Beijing Jiaotong University , Beijing 100044 , China)

Abstract: In order to satisfy the stringent requirements of high accurate measurement of quadratic curve parameters in vision detection , a novel measurement method based on vision image is proposed in this paper , which can be used to carry out precise parameter estimation of quadratic curve. The edge of quadratic curve is fully extracted using multiple structuring element-based generalized morphological edge detection algorithm; meanwhile the influences of noises on image are diminished. In subpixel image processing , according to the edge parameters computed based on the principle of Zernike moment edge detection , an edge detection algorithm is proposed to locate the subpixel edge of quadratic curve , and circular edge location is accomplished through establishing the mapping between the edge point and the parameters of the circle where the edge points lie in images. Then , the estimation of quadratic curve parameters based on a set of subpixel edge-point data is realized through defining and minimizing an error function that is used to optimize the distribution of data points. Experimental results show that the algorithm is very accurate and stable , and the uncertainty is better than 0.03 pixel. The proposed method is very effective in detecting quadratic curves for vision measurements.

Key words: vision image; quadratic curve; multiple structuring element; Zernike moment; moment-preserving; fitting

1 引 言

在机器视觉和计算机视觉中,与二次曲线(涉及圆锥)有关的测量应用比较广泛,主要是因为圆形特征作为人造标志点被广泛应用于视觉检测^[1-6]。由于圆形特征由物体空间到图像空间转变过程中,信号要经过几个光电过程,每次都有畸变过程,无论是线性还是非线性的。因此在正交和透视投影下,通过视觉系统获取的圆形特征曲线始终是一个椭圆。

在视觉检测中与二次曲线(圆或椭圆)相关的问题可大致分为3类:1)在模式识别和场景分析中,圆形标志也被广泛作为确定摄像机标定中的标定^[5];2)在机器视觉测量中,圆形标志被广泛应用于视觉伺服控制系统的高精度装配任务^[8],以及表面贴装元件的精确定位^[9];3)在直接的或反向的三维定位问题中,人造(以及自然的)的圆球形标志已广泛应用在各种姿态估计问题^[10]。在所有上述情况下,必须精确计算二次曲线特征参数,其目的或是在二维图像平面为了测量(大小比较),或是在物体空间为了三维方向和位置估算。

在这些与视觉检测相关的二次曲线特征参数计算中,所估计的参数精度不仅取决于准确的边缘数据点精密定位,同样取决于各种主要误差源的补偿^[11]。在某些情况下,从物体空间到图像空间而不考虑各种误差来源的内在转变,简单的全局性阈值和简单的全局曲线拟合即可。但是很显然,这种简单的处理方法,不会很准确地计算出二次曲线的参数。

本文基于图像几何结构特征的数学形态学边缘检测和 Zernike 矩亚像素边缘定位技术相比于其他定位算法的优势^[12-16],提出了一种精确计算灰度图像二次曲线(圆或椭圆)特征参数的普遍适用方法。为了补偿视觉成像系统获取的曲线产生的畸变,给出了精确定位曲线边缘点的亚像素边缘检测算法;同时也考虑了涉及各种畸变因素(误差来源)的补偿,给出了对数据点的分布进行标准化的参数拟合算法。最后给出了实验验证结果。

2 圆特征图像边缘初始定位

数学形态学边缘提取,利用预先定义的变结构元对图像进行匹配或局部修正,可在提取边缘细节信息的同时抑制噪声。但只采用单一的结构元素,在进行边缘提取并滤除噪声的同时,由于其方向和结构的单一性也会损失一些图像边缘的细节特征^[17]。因此,本文提出一种新的变结构元广义形态学边缘提取算法对

图像进行有效地边缘提取。这种滤波器由于具有空间不变性,不仅有效地抑制了图像中的噪声,而且很好地保持了图像的边缘细节信息,为后续的图像处理提供了高质量的图像。

设 $f(x, y)$ 为定义在二维离散空间 Z^2 (Z 表示整数集合) 上的数字图像,结构元 $B(k, l)$ 为 Z^2 上的子集,即 $B(k, l) \subset Z^2$,形态膨胀和腐蚀分别定义为:

$$(f \oplus B)(x, y) = \max_{(k, l) \in B} [f(x - k, y - l) + B(k, l)] \quad (1)$$

$$(f \ominus B)(x, y) = \min_{(k, l) \in B} [f(x + k, y + l) - B(k, l)] \quad (2)$$

采用广义形态学边缘提取算法检测得到的边缘图像 $E_{ij}(x, y)$ 为:

$$E_{ij}(x, y) = [f(x, y) \ominus B_i(x, y)] - [f(x, y) \ominus B_j(x, y)] \quad (3)$$

式中: $B_i(k, l)$ ($i = 1, 2, \dots, N$) 和 $B_j(k, l)$ ($j = 1, 2, \dots, M$) 为选定的变结构元。

利用变结构元在结构和方向上的对称和互补特性,可充分提取图像边缘各个方向上的细节特征,同时有效地平滑图像的噪声,由此可得变结构元广义形态学边缘提取的边缘图像 $\bar{E}(x, y)$ 为:

$$\bar{E}(x, y) = \frac{1}{N} \left\{ \sum_{k=1}^m [E_{k, k+m}(x, y) + E_{k+m, k}(x, y)] \right\} \quad (4)$$

式中: N 为选定的变结构元的个数, $m = N/2$ 为选定的变结构元中结构和方向上互补的元素个数,对每一个确定的 k 和 m , $E_{k, k+m}(x, y)$ 和 $E_{k+m, k}(x, y)$ 为对一组结构和方向上互补的变结构元采用式(3)计算得到的边缘图像。

为了有效消除图像中比结构元小的噪声,同时避免大的结构元平滑图像边缘细节信息和由此带来的计算复杂度,取如图1所示的 3×3 邻域内的三点线性变结构元进行多尺度广义形态滤波。

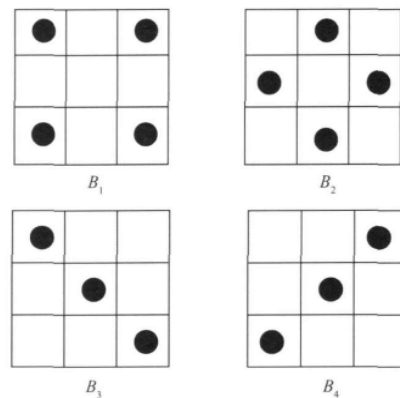


图1 形态滤波器的变结构元

Fig. 1 Multiple structuring elements of morphological filter

3 Zernike 矩亚像素边缘参数计算

根据 Zernike 矩的定义, Ghosal. S 建立了用 Zernike 矩进行边缘亚像素定位算法^[15-16], 其理想阶跃模型如图 2 所示, 图中 k 为阶跃幅度 h 是背景灰度 l 为中心点到边缘的距离 φ 为中心点到边缘垂线与 x 轴的夹角。

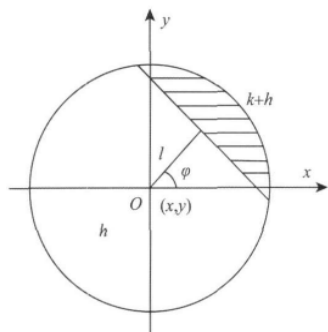


图 2 理想边缘阶跃模型

Fig. 2 Ideal step edge model

根据 Zernike 矩的复数矩幅度的旋转不变性, 将图像顺时针旋转 φ 角, 这时图 2 中的边缘直线平行于 y 轴。设旋转后的图像为 $f'(x, y)$, 则有:

$$\iint_{x^2+y^2 \leq 1} f'(x, y) y dy dx = 0 \quad (5)$$

相应原始图像的 Zernike 矩 A_{nm} 与旋转后图像的 Zernike 矩 A'_{nm} 关系为:

$$A'_{00} = A_{00} \quad A'_{11} = A_{11} e^{j\varphi} \quad A'_{20} = A_{20} \quad (6)$$

根据式 (5) 和 (6), 以及图 2 所示的模型, 可以推导出亚像素边缘参数:

$$l = A_{20} / A'_{11} \quad (7)$$

$$k = 3A'_{11} / 2(1 - l^2)^{3/2} \quad (8)$$

$$h = \frac{A_{00} - \frac{k\pi}{2} + k \arcsin l + kl \sqrt{(1 - l^2)}}{\pi} \quad (9)$$

4 二次曲线亚像素边缘定位算法

4.1 理想的边缘参数模型

为了精确定位图像中的二次曲线特征边缘点, 给出理想台阶边缘模型^[18], 如图 3 所示。根据模型, 边缘元素可以认为是发生在两相邻区域 A_1 和 A_2 的边界, 两区域对应的面积分别为 a_1 和 a_2 。区域 A_1 和 A_2 具有不变的灰度 h 和 $h+k$, 它们出现的频率分别为 p_1 和 p_2 。这里 $p_1 + p_2 = 1$, $h = h_1$, $h_2 = h + k$ 。直线和检测圆包围的区域 a_{2l} 与检测圆和被检测曲线满足约束: $a_2 = a_{2l} = a_{2r}$, L 表示法线

长度上检测圆圆心到直线的垂线距离。

假设边界曲线通过半径为 R 的圆表示, 通过式 (10) 可知:

$$(x - X_0)^2 + (y - Y_0)^2 = R^2 \quad (10)$$

式中: R 为被检测圆的半径 $x^2 + y^2 \leq r^2$, (X_0, Y_0) 为相对于检测圆坐标系的被检测圆圆心坐标。正如图 3 所示, 边缘点为直线与被检测圆的相交点 (x_3, y_3) 和 (x_4, y_4) 。可以利用直线与被检测圆边界曲线之间的特殊几何关系, 建立计算边缘点 (x_3, y_3) 和 (x_4, y_4) 的等式。

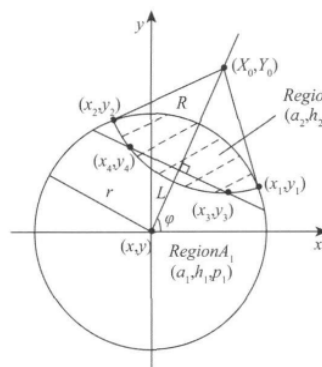


图 3 理想的边缘参数模型

Fig. 3 Ideal edge parameter model

4.2 比例参数的计算

为了计算理想边缘参数模型区域 A_1 和 A_2 在单位圆分别出现的比例参数 p_1 和 p_2 , 利用 Zernike 矩边缘检测算法计算出的参数 h 和 k , 并引入保矩法^[19] 来计算参数 p_1 和 p_2 , 矩的计算是利用单位圆模板内的像素得到的。

当模板内的图像 f 被阈值分割为 2 个不同的区域 A_1 和 A_2 , 分别具有灰度 h_1 和 h_2 。图像 f 能被作为一个理想的、具有双层灰度的模糊图像, 这里 $h_2 \leq h_1$, 那么模板内图像 f 的前 4 个矩保存在经过分割后的模板内图像 g 内, 获得的图像 g 能够看作理想的、未被模糊的图像 f 。也就是说, 矩特性在成像前后保持不变。根据保矩法, 最终可以计算出 p_1 和 p_2 :

$$p_1 = \frac{h_2 - m_1}{h_2 - h_1} \quad p_2 = 1 - p_1 \quad (11)$$

4.3 亚像素边缘定位算法

法线上距离 L 的值可以通过计算直线与检测圆所包围的区域 a_{2l} 得到, 这里:

$$a_2 = a_{2l} = p_2 \pi r^2 = \iint_A dx dy \quad (12)$$

利用计算出来的 p_2 值, 以及 Zernike 矩边缘检测得到的参数 h 和 k , 通过解 a_{2l} , 由几何关系可以得到下面的等式:

$$\begin{cases} r^2 \arcsin\left(\frac{\sqrt{r^2 - L^2}}{r}\right) - L \sqrt{r^2 - L^2} - a_{2l} = 0, p_1 \geq p_2 \\ 0.5\pi r^2 - L \sqrt{r^2 - L^2} - r^2 \arcsin\left(\frac{L}{r}\right) - a_{2l} = 0, \text{其他} \end{cases} \quad (13)$$

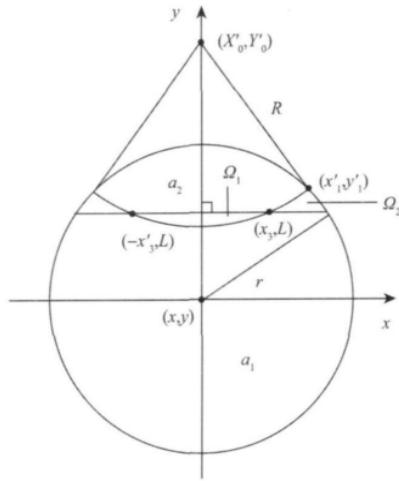
图 4 角度旋转后的检测圆模型^[18]

Fig. 4 A detection circle model after rotating an angle

如果检测圆在原位置逆时针旋转角度 $[(\pi/2) - \varphi]$ 那么法线 n 与 Y 轴重合 (见图 4)。让 (X_0, Y_0) 为 (X_0, Y_0) 旋转后的坐标, (x_3, y_3) 和 (x_4, y_4) 旋转后的坐标分别为 (x'_3, y'_3) 和 $(-x'_3, y'_3)$, 可以得到下列等式:

$$x'_3 = x_3 \sin \varphi - y_3 \cos \varphi \quad (14)$$

$$y'_3 = L = x_3 \cos \varphi + y_3 \sin \varphi \quad (15)$$

旋转后的被检测物体和单位圆取样模板所限定的区域 A_2 的面积 a_2 可以被定义如下:

$$a_2 = a_{2r} = p_2 r^2 \pi = 2 \int_0^{x'_1} \int_{Y_0 - \sqrt{R^2 - x'^2}}^{\sqrt{r^2 - L^2}} dx dy \quad (16)$$

通过解式 (16) 对于未知数 x'_3 , 根据几何关系有下列等式成立:

$$\begin{cases} r^2 \arcsin \frac{x'_1}{r} + R^2 \arcsin \frac{x'_1}{R} - x'_1 Y'_0 - a_2 = 0, p_1 \geq p_2 \\ 0.5\pi r^2 + r^2 \arccos \frac{x'_1}{r} + R^2 \arcsin \frac{x'_1}{R} - x'_1 Y'_0 - a_2 = 0, \text{其他} \end{cases} \quad (17)$$

式中:

$$Y'_0 = L + \sqrt{R^2 - x'^2_3},$$

$$x'_1 = \sqrt{r^2 - \left(\frac{r^2 - L^2 + 2LY'_0 - x'^2_3}{2Y'_0} \right)}.$$

由于图 4 中关于 Y 轴的对称性, 并且因为检测圆内直线段分割的区域与圆弧分割的区域相等 (边缘模型的参数 a_2), 面积 Ω_1 和 Ω_2 也相等, 点 (x'_3, y'_3) 在直线的相对位置是半径 R 的弱函数 (即半径 R 的选择对圆形曲线边缘数据点的位置影响很小, 可以忽略)。让 K 表示点 (x'_3, y'_3) 的相对位置, K 可以表示为:

$$K = \frac{x'_3}{\sqrt{r^2 - L^2}} \quad (18)$$

因此, 当参数 l, h, φ 和 k 的值, 通过直线边缘算子计算出以后, 可以计算曲线边缘数据点 (x_3, y_3) 和 (x_4, y_4) 的亚像素坐标:

$$\begin{aligned} x_3 &= x + L \cos \varphi + K \sqrt{r^2 - L^2} \sin \varphi \\ y_3 &= y + L \sin \varphi - K \sqrt{r^2 - L^2} \cos \varphi \\ x_4 &= x + L \cos \varphi - K \sqrt{r^2 - L^2} \sin \varphi \\ y_4 &= y + L \sin \varphi + K \sqrt{r^2 - L^2} \cos \varphi \end{aligned} \quad (19)$$

5 二次曲线特征参数拟合算法

文中, 二次曲线主要考虑椭圆和圆 2 种情况, 由于圆是椭圆的特殊情况, 因此仅进行椭圆参数估计。椭圆参数估计的基本方法一般是利用最优化技术, 通过定义误差函数并使其最小化^[18-20]。从纯数学的角度来看, 就是从给定的一组椭圆形二维图像边缘点坐标, 确定这些点的最佳椭圆拟合, 由此计算出椭圆参数。

5.1 定义误差函数

椭圆的通用等式为:

$$Q(X, Y) = aX^2 + bXY + cY^2 + dX + eY + 1 = 0 \quad (20)$$

对于给定的 N 个数据点, 拟合一个椭圆就是利用使误差函数最小化的最小二乘误差准则:

$$J_1 = \sum_{i=1}^N [Q(X_i, Y_i)]^2_{f=1} \quad (21)$$

式中: (X_i, Y_i) $i = 1, 2, \dots, N$ 为要拟合椭圆的一组数据点。最小化等式 (21) 会得到一组线性方程组, 最终可确定参数向量 $W^T = (a, b, c, d, e, f)$, 因此该优化过程是非迭代的, 运算速度快。然而, 由于误差函数的几何性质, 数据点的分布并不一致, 这会影响参数估计的精度。所以, 为了实现椭圆参数的精确计算, 必须对数据点的分布进行标准化。

让 (X_i, Y_i) ($i = 1, 2, \dots, N$) 为椭圆的一组数据点, 并且让最优的椭圆参数是 (A, B, θ, X_0, Y_0) 。此外, 让 $(A', B', \theta, X_0, Y_0)$ 为经过数据点 (X_i, Y_i) 的椭圆参数。两个椭

圆是同心的, 并有相同的偏心率和方向(见图 5)。如果 S 为数据点椭圆的面积, S' 为最优椭圆面积, 那么误差可以被定义为两椭圆面积的差:

$$e_i = S - S' \quad (22)$$

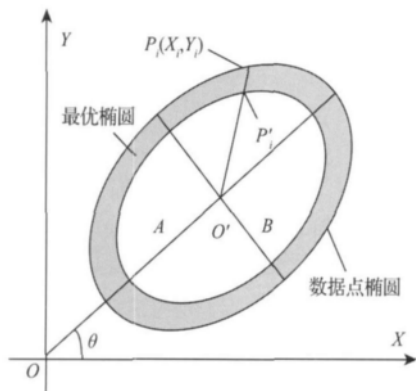


图 5 两同中心椭圆不同面积定义

Fig. 5 The area difference between two concentric ellipses

为了计算误差 e_i , 首先考虑一条通过数据点 $P_i(X_i, Y_i)$ 和椭圆中心 $O'(X_0, Y_0)$ 的直线; 这条直线和最优椭圆的交点是 $P'_i(X'_i, Y'_i)$ 。通过定义 $d_i = P'_i O'$, $d'_i = P_i O'$ 和 $\delta_i = d'_i - d_i$, 基于两椭圆的相似性, 可以得到下面的关系:

$$e_i = \pi(AB) \left(1 - \frac{d_i^2}{d_i'^2}\right) \quad (23)$$

通过定义一个加权系数 w_i 对数据点的分布进行标准化, 加权系数 w_i 是单个数据点位置的函数, 因此新的误差函数可以被定义为:

$$J_2 = \sum_{i=1}^N [w_i \frac{1}{\pi AB} (S - S')]^2 = \sum_{i=1}^N [w_i Q(X_i, Y_i)]^2 \quad (24)$$

5.2 特征参数计算

利用等式(22)定义的误差, 以及数据点分布的标准化, 对等式(24)最小化。在最小化误差函数 J_2 中, 通过对 J_2 求关于 5 个未知数(a, b, c, d 和 e)的一阶导数, 可以得到含有 5 个未知数的 5 个线性方程组, 方程组的解是向量 $W^T = (a, b, c, d, e)$ 。最终, 可计算出优化椭圆的如下参数:

$$X_0 = \frac{2cd - be}{b^2 - 4ac}, Y_0 = \frac{2ae - bd}{b^2 - 4ac} \quad (25)$$

$$A^2 = \left[\frac{2(1 - F_s)}{b^2 - 4ac} \right] [(c + a) + \sqrt{(c - a)^2 + b^2}] \quad (26)$$

$$B^2 = \left[\frac{2(1 - F_s)}{b^2 - 4ac} \right] [(c + a) - \sqrt{(c - a)^2 + b^2}] \quad (27)$$

$$\theta_A = \arctan \left[\frac{(c - a) + \sqrt{(c - a)^2 + b^2}}{b} \right] \quad (28)$$

$$\text{式中: } F_s = \frac{bde - ae^2 - cd^2}{b^2 - 4ac}.$$

6 实验与分析

6.1 算法的有效性和精度实验

为了验证算法的有效性和精度, 利用计算机生成的标准图像对算法进行检验。考虑到实际采集图像时, 会受到畸变因素的影响, 为了更好地模拟真实测量环境, 对标准图像加入高斯噪声。实验所用带噪声标准圆图像如图 6 所示, 图像大小为 600×600 像素, 圆心位置在 (258.5, 243.5), 半径为 100 像素, 噪声为高斯噪声 $\Delta = 0.01$ 。利用提出的亚像素边缘检测算法处理后的图像如图 7 所示, 定位结果如表 1 所示。

表 1 带噪声标准圆定位结果

Table 1 The edge location results for

standard circle with noise		像素	
带噪声标准圆 实际位置	带噪声标准圆 计算位置	X 轴 定位误差	Y 轴 定位误差
(157.799, 210.200)	(157.826, 210.214)	0.027	0.014
(236.576, 159.600)	(236.567, 159.612)	-0.009	0.012
(337.692, 294.460)	(337.715, 294.489)	0.023	0.029
(186.490, 177.255)	(186.493, 177.296)	0.003	0.018
(313.127, 187.437)	(313.145, 187.449)	0.018	0.012

从表 1 可以看出, 利用提出的亚像素边缘检测算法对带高斯噪声的标准图像进行定位, 在 X 轴方向最大有 0.027 像素的定位误差, 在 Y 轴方向最大有 0.029 像素的定位误差。

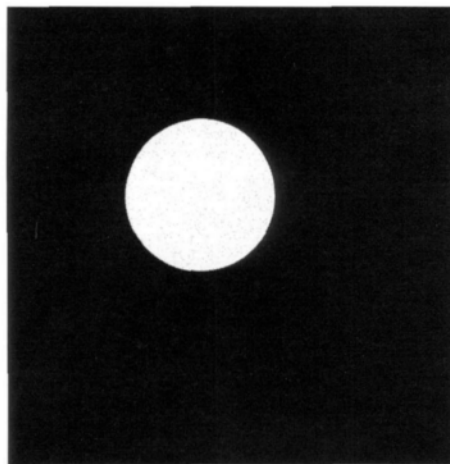


图 6 带噪声标准圆

Fig. 6 Standard circle with noise

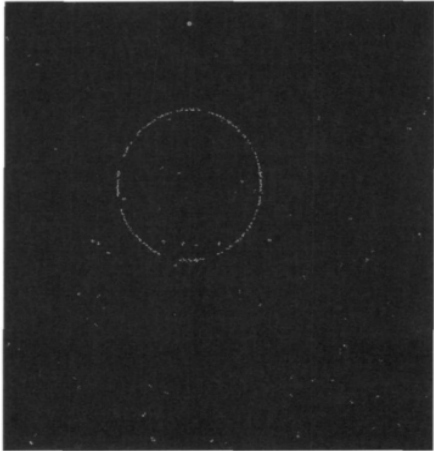


图 7 利用所提出的算法处理后图像
Fig. 7 The processed image using the proposed method

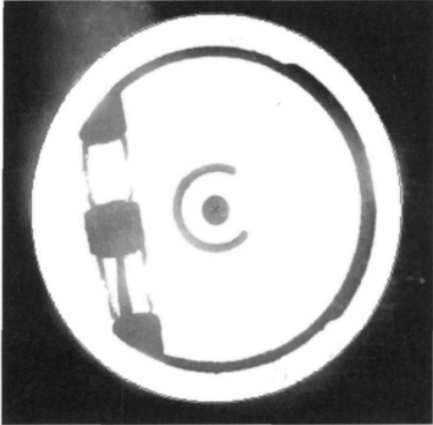


图 10 圆形标志定位后图像
Fig. 10 Location image for circle object using the proposed method

6.2 实际采集的视觉图像测试结果

实验中,利用制作的石英挠性器件圆形标志物,通过视觉测量系统对其进行采集,得到的圆形标志物目标图像如图 8 所示,图 9 为亚像素边缘定位后的图像,图 10 为参数定位图像。表 2 为圆形标志中心定位结果。

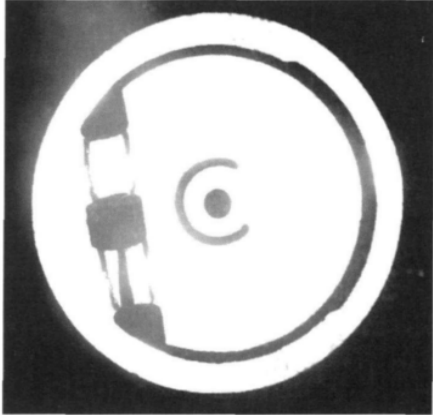


图 8 实验采集到的图像
Fig. 8 Real measured image

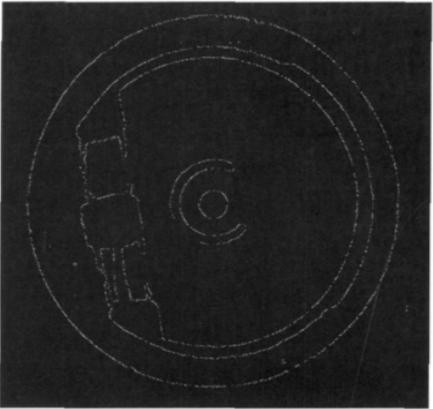


图 9 亚像素边缘定位图像
Fig. 9 The processed image using subpixel edge detection

利用提出的算法对图像进行处理和计算,计算出的圆心坐标(X_0, Y_0)为(317.408 4 296.873 8)像素,长半径 A 为276.469 7像素,短半径 B 为275.555 4像素,方向角 θ 为-0.339 3。另外,对图像进行多次采集,处理和计算后的圆心坐标如表 2 所示。

表 2 圆形标志中心定位结果

Table 2 Location results of the centre for circle object
像素

测量次数	X 轴定位	Y 轴定位
1	317.408 4	296.873 8
2	317.371 5	296.870 3
3	317.362 4	296.844 6
4	317.413 2	296.852 9
5	317.388 5	296.860 2
6	317.372 9	296.821 9
7	317.430 6	296.857 1
8	317.378 3	296.833 8
9	317.409 3	296.872 9
10	317.392 7	296.829 4
定位不确定度(2σ)	0.022 0	0.019 0

由实验和计算结果可知,利用所提出的算法对圆形标志进行定位,定位不确定度优于 ± 0.03 像素;利用数据点分布标准化的参数拟合算法,可以实现特征参数的精确测量。

7 结 论

本文基于图像几何结构特征的数学形态学边缘检测算法和 Zernike 矩亚像素边缘定位算法,提出了一种精确计算二次曲线(圆或椭圆)灰度图像特征参数的普遍适用方法。为了补偿成像系统获取的曲线产生的畸变,给

出了精确定位曲线边缘点的亚像素边缘检测算法;同时也考虑了涉及各种畸变因素(误差来源)的补偿,给出了计算特征参数的数据点分布优化的误差拟合方法;最后给出了实验验证结果。实验结果表明,定位不确定度优于 ± 0.03 像素。算法稳定性好,精度高,可以实现各种视觉检测中关于二次曲线(圆或椭圆)灰度图像特征参数的精密测量问题。

参考文献

- [1] SCHMID C, ZISSERMAN A. The geometry and matching of lines and curves over multiple views[J]. *Int'l Journal Computer Vision*, 2000, 40(3): 199-233.
- [2] MA S D, LI L. Ellipsoid reconstruction from three perspective views[C]. *Proceedings of the ICPR, Austria*, 1996, 1(25-29): 344-348.
- [3] 周平, 王肖玉, 刘越, 等. 并行流水线实现的多红外标志点实时标记与识别新方法[J]. *仪器仪表学报*, 2009, 30(6): 1240-1244.
ZHOU P, WANG X Y, LIU Y, et al. New real-time labeling and recognition method for multiple infrared markers based on parallel pipeline[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2009, 30(6): 1240-1244.
- [4] KANATANI K, OHTA N. Automatic detection of circular objects by ellipse growing[J]. *Memoirs of the Faculty of Engineering*, 2001, 36(1): 107-116.
- [5] 洪占勇, 杨永跃, 邓善熙. 车轮热轧轮胚尺寸激光测量系统的研究[J]. *电子测量与仪器学报*, 2010, 24(7): 686-691.
HONG ZH Y, YANG Y Y, DENG SH X. Research on laser measurement system of hot-rolling wheel size[J]. *Chinese Journal of Electronic Measurement and Instrument*, 2010, 24(7): 686-691.
- [6] 周富强, 张广军, 江洁. 空间圆几何参数的非接触高精度测量方法[J]. *仪器仪表学报*, 2004, 24(5): 604-607.
ZHOU F Q, ZHANG G J, JIANG J. High accurate non-contact method for measuring geometric parameters of spatial circle[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2004, 24(5): 604-607.
- [7] HEIKKILA J. Geometric camera calibration using circular control points[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2000, 22(10): 1066-1077.
- [8] MALASSIOTIS S, STRINTZIS M G. Stereo vision system for precision dimensional inspection of 3D Holes[J]. *Machine Vision and Applications*, 2003, 15(2): 101-113.
- [9] WU W Y, WANG M J, LUI CH M. Automated inspection of printed circuit boards through machine vision[J]. *Computer in Industry*, 1996, 28(2): 103-111.
- [10] MENG X Q, HU Z Y. A new easy camera calibration technique based on circular points[J]. *Pattern Recognition*, 2003, 36(5): 1155-1164.
- [11] KAMGAR-PARSI B, KAMGAR-PARSI B. Evaluation of quantization error in computer vision[J]. *IEEE Trans. PAMI-11*, 1989, 11(9): 929-940.
- [12] 佟庆彬, 张晓冬, 丁振良, 等. 基于激光视觉的石英摆片厚度测量[J]. *仪器仪表学报*, 2010, 31(6): 1358-1363.
TONG Q B, ZHANG X D, DING ZH L, et al. 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.
- [13] 郑毅. 基于 Zernike 矩的管道弯曲度高精度检测[J]. *仪器仪表学报*, 2006, 27(5): 523-526.
ZHENG Y. Camber measurement based on zernike moments at high accuracy[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2006, 27(5): 523-526.
- [14] 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 B ZH, ZHAO ZH M, HUA J. Sub-pixel edge detection method based on improved morphological gradient and Zernike moment[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2010, 31(4): 838-844.
- [15] GHOSAL S, MEHROTRA R. Orthogonal moment operators for subpixel edge detection[J]. *Pattern Recognition*, 1993, 26(2): 295-306.
- [16] GHOSAL S, MEHROTRA R. Edge detection using orthogonal moment-based operators[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1992, 7(12): 413-417.
- [17] 敖磊, 谭久彬, 崔继文, 等. 激光 CCD 二维自准直仪中圆目标中心精确定位算法[J]. *光学精密工程*, 2005, 13(6): 668-673.
AO L, TAN J B, CUI J W, et al. Precise center location algorithm for circle target in CCD laser dual axis autocollimator[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2005, 13(6): 668-673.
- [18] REED J M, HUTCHINSON S. Image fusion and subpixel parameter estimation for automated optical inspection of electronic components[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 1996, 43(3): 346-354.
- [19] TSAI W. Moment-preserving thresholding: A new approach[J]. *Computer Vision, Graphics and Image Processing*, 1985, (29): 377-393.

- [20] CUI Y, WENG J, REYNOLDS H. Estimation of ellipse parameters using optimal minimum variance estimator[J]. Pattern Recognition Letters, 1996, 17(3) : 309-316.

作者简介



佟庆彬 2008 年于哈尔滨工业大学获博士学位, 现为北京交通大学电气工程学院讲师、博士后, 主要研究方向为电气设备在线监测与故障诊断自动化测试与精密计量, 高速数据、图像采集与处理系统。

E-mail: tqbin818@ 126. com

Tong Qingbin received his Ph. D. degree from Harbin Institute of Technology in 2008. Currently, he is a lecturer and post doctor in Beijing Jiaotong University. His main research direction includes electrical equipment on-line monitoring and fault diagnosis, automated testing and precision measurement, high-speed data, image acquisition and processing system.