

基于亚像素边缘的摄像机标定板特征提取算法

姚强¹, 王亚刚¹, 张伟¹, 王凯^{1,2}

(1.上海理工大学, 上海 200093; 2.上海印刷出版高等专科学校, 上海 200093)

摘要: **目的** 在视觉测量领域, 摄像机的标定精度是最终测量精确度的决定性因素, 为了提高标定板特征的提取精度, 提出一种基于亚像素边缘的提取方法。**方法** 针对圆点标定板, 首先采集标定板图像, 对图像进行处理, 获取像素级别边缘, 然后以边缘像素点为中心, 取 3×3 的数字窗口计算梯度方向, 在梯度方向上进行像素点灰度的双曲正切拟合, 获取亚像素级别边缘, 最后对亚像素边缘按照圆形进行拟合, 求得圆心坐标。**结果** 实验表明算法的分辨率达到0.03个像素, 精度可达0.1个像素。**结论** 该算法具有稳定可靠, 精度高, 运算速度快等特点, 能够应用于图像拼接和分割, 特征提取和摄像机标定等领域。**关键词:** 亚像素; 摄像机标定; 双曲正切拟合; 边缘检测

中图分类号: TP391 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2018)11-0165-06

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2018.11.029

Extraction Algorithm of Camera Calibration Board Feature Based on Sub-pixel Edge

YAO Qiang¹, WANG Ya-gang¹, ZHANG Wei¹, WANG Kai^{1,2}

(1.Shanghai University of Science and Technology, Shanghai 200093, China;

2.Shanghai Publishing and Printing College, Shanghai 200093, China)

ABSTRACT: The work aims to propose an extraction method based on the sub-pixel edge, in order to improve the extraction precision of the calibration board feature, as the camera calibration precision is the decisive factor in the field of vision measurement. Firstly, the calibration board image was acquired and processed to obtain the edge at pixel level regarding the dot calibration board. Then, 3×3 digital window was taken to calculate the gradient direction, taking the edge pixel as the center. The edge at sub-pixel level was obtained by gray level fitting in the gradient direction based on hyperbolic tangent. Finally, the center coordinates were acquired by the sub-pixel edge fitting according to the circle. The experiment showed that the resolution of the algorithm reached 0.03 pixels and the precision could reach 0.1 pixels. Characterized by stability, reliability, high precision and fast computing speed, the proposed algorithm can be applied in the field of image splicing and segmentation, feature extraction and camera calibration.

KEY WORDS: sub-pixel; camera calibration; hyperbolic tangent fitting; edge detection

视觉测量技术是当今研究的一个热门领域, 广泛应用于各行各业, 如在汽车制造业, 汽车零部件关键几何尺寸的精确测量, 它是保证零件精确配合和机车性能的基础^[1]; 在医疗行业, 手术机器人包含三大部分, 医生主手、手术从手和视觉系统^[2], 医生做手术的依据是高精度的视觉系统, 它是医生做精密手术的基础; 在包装印刷业, 特殊包装印刷品的缺陷检测,

有时用肉眼难以察觉或者需要耗费巨大的人力成本, 视觉测量可以对包装印刷品的缺陷实现精确定位^[3]。

视觉系统软硬件搭建好以后, 面临的首要问题就是摄像机标定, 采用较好的摄像机标定为后续的高精度测量和精准定位做好必要的准备。传统的摄像机标定大多采用基于整像素级别的标定板特征提取技术, 这种技术已经比较成熟, 但随着工业影像测量和腹腔

收稿日期: 2017-08-04

基金项目: 国家自然科学基金(11502145, 61074087, 61703277)

作者简介: 姚强(1987—), 男, 上海理工大学硕士生, 主攻图像处理和嵌入式系统。

通信作者: 王亚刚(1967—), 男, 博士, 上海理工大学教授, 主要研究方向为系统辨识和智能机器人。

镜医疗手术的进一步发展,传统方法^[4-5]已难以满足高精度要求。目前的圆形特征检测大多基于 Hough 变换算法或基于最小二乘拟合算法。如 Nightingale 等^[6]提出的质心法,它对成像图像灰度分布均匀要求较高,但实际测量场合极易受噪声干扰,因此应用领域有局限性。如夏瑞雪等^[7]利用自适应阈值分割和最小二乘椭圆拟合实现圆点靶标图像特征定位,但其定位精度不高,约为 0.3 个像素,运算效率低。如张虎等^[8]在进行亚像素定位边缘定位步骤中需要用到灰度插值及灰度差求取运算,运算量较大,且可能出现孤立点,采用曲率滤波又进一步增加了该算法的复杂性,实时性较差,16 个圆心定位耗时约 0.953 s。上述文献中算法的高运算效率和高计算精度是不可兼得的,测量精度高,实时性则不高,运算快,精度就大大降低,因此,文中提出一种新的亚像素级别的特征提取算法^[9],计算时间达到毫秒级别满足实时性要求,其标定精度也大大提高,达到 0.1 个像素。

1 圆中心的亚像素检测原理及算法

圆点标定板的圆心为摄像机的标定特征点,首先对标定板圆点边缘进行像素级别粗定位,然后在像素级别边缘的基础上获取亚像素级别边缘,最后对亚像素边缘按照圆形边缘进行最小二乘拟合^[10-11],亚像素级别圆心坐标即是要提取的标定板特征。

1.1 边缘粗定位

在像素级别的边缘检测算子中, Canny 算子效果最佳^[12-13],首先利用 Canny 边缘检测算子,得到圆的粗定位边缘和边缘点的图像坐标值。Canny 边缘检测的基本思想为:先对图像进行高斯滤波去除噪声干扰;获取图像的梯度幅值和方向;采用非极大值抑制技术细化边缘;采用双阈值方法去除伪边缘。

1.2 亚像素边缘定位

若不考虑镜头的模糊作用^[14],理想的阶跃边缘模型见图 1。

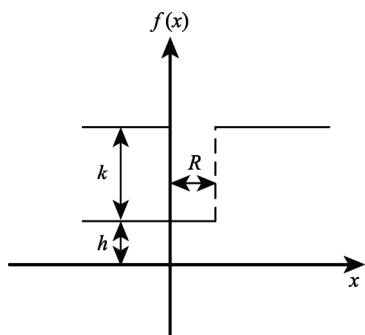


图 1 理想阶跃边缘模型
Fig.1 Ideal step edge model

图 1 中 h 为边缘图像背景灰度, k 为边缘和背景

的灰度差值,那么 R 处理理想边缘函数可表示为:

$$f(x) = \begin{cases} h & x \leq R \\ h+k & x > R \end{cases} \quad (1)$$

实际图像的边缘难免会受到镜头的模糊作用,图像处理研究表明实际的阶跃边缘图像可看作是理想阶跃模型 $f(x)$ 与高斯函数 $G(x)$ 的卷积,见式(2)。

$$I(x) = f(x) * G(x) = h + \left(\frac{k}{\sqrt{2\pi}\sigma} \right) \int_{-\infty}^x \exp\left(-\frac{(\mu-R)^2}{2\sigma^2}\right) d\mu \quad (2)$$

式中: $G(x) = (1/\sqrt{2\pi}\sigma) \exp(-x^2/2\sigma^2)$; $I(x)$ 为实际灰度值; σ 为模糊因子。

理想的阶跃边缘与高斯函数卷积见图 2。

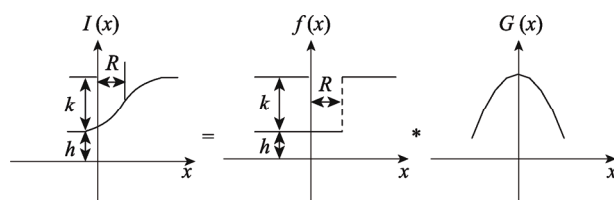


图 2 理想阶跃函数与高斯函数卷积

Fig.2 Convolution of ideal step function and Gauss function

与阶跃函数卷积的结果就是该函数的变上限积分,阶跃函数是个理想积分器。由上述理论可知,在梯度方向,特征边缘梯度幅值的分布可以近似为高斯曲线分布,其分布的极值点即为边缘点。那么边缘点梯度方向的像素点灰度值服从高斯积分曲线分布^[15],可以在粗定位的基础上对梯度方向上的像素点灰度值进行拟合,拟合函数本应选取高斯积分函数,但由于高斯函数具有不可积性,这里选取在理论上可以近似替代它的双曲正切函数,它简化了运算量,提高了运算速度,双曲正切曲线的拐点即为所求的亚像素边缘位置,见图 2。

1.2.1 边缘点梯度方向的确定

以粗定位像素点为中心,在 3×3 大小的数字窗口中计算该像素点的梯度方向,之所以选择 3×3 是因为区域过大会增大运算量,降低运算速度和实时性;区域过小则不能完备考查周围像素点的信息,造成梯度方向难以确定和出现粗大误差的可能性增大。经过反复试验证明采用 3×3 大小的数字窗口可以达到预期效果。Sobel 算子有 2 个模板,一个检测水平方向,另一个检测垂直方向的。假设水平方向的梯度幅值为 G_x ,垂直方向梯度幅值为 G_y ,则该像素点的梯度方向为:

$$\theta = \arctan\left(\frac{G_y}{G_x}\right) \quad (3)$$

1.2.2 边缘点梯度方向灰度值的插值运算^[16]

点 O 为粗定位边缘的某一点,建立如图 3 所示

的坐标系, 点 O 的梯度方向斜率绝对值要么大于等于 1, 要么小于 1, 设 O 点坐标为 $O(x_0, y_0)$, 梯度方向斜率为 k , 则过点 O 斜率为 k 的直线 L 方程为:

$$y = k(x - x_0) + y_0 \quad (4)$$

根据斜率的不同选择合适的梯度方向临近点, 设 M 坐标为 (x_M, y_M) , 则 $x_M = x_0 + 1/k, y_M = y_0 + 1$ 。

当 $k \geq 1$ 时, 直线 L 与 $y = y_0 + 1$ 的相交点 M 为临近点, 由 $M_1([x_M], y_M)$ 和 $M_2([x_M], y_M)$ 2 点的灰度值线性插值计算得到点 M 的灰度值为^[16]:

$$g(x_M, y_M) = (1 - \lambda) \times g([x_M], y_M) + \lambda \times g([x_M] + 1, y_M) \quad (5)$$

式中: $[x_M]$ 为将 x_M 坐标取整; $\lambda = x_M - [x_M]$; $g(x_M, y_M)$ 为整像素点 (x_M, y_M) 的灰度值。

当 $k < 1$ 时, 直线 L 与 $x = x_0 + 1$ 的相交点 N 为临近点, 同理可得 N 点的灰度值为:

$$g(x_N, y_N) = (1 - \mu) \times g(x_N, [y_N]) + \mu \times g(x_N, [y_N] + 1) \quad (6)$$

式中: $\mu = x_M - [x_M]$ 。

同理, 当以点 O 为对称中心分别求出粗定位像素点梯度方向的 6 个临近点灰度值。当 $k \geq 1$ 时, 这 6 个点分别为梯度方向直线 L 与整像素点所在直线 $y = y_0 - 3, y = y_0 - 2, y = y_0 - 1, y = y_0 + 1, y = y_0 + 2, y = y_0 + 3$ 的交点; 当 $k < 1$ 时, 这 6 个点分别为梯度方向直线 L 与整像素点所在直线 $x = x_0 - 3, x = x_0 - 2, x = x_0 - 1, x = x_0 + 1, x = x_0 + 2, x = x_0 + 3$ 的交点。这样任意整像素边缘点的梯度方向均可以得到 7 个关于中心对称的像素点灰度值, 每相邻 2 个像素点是等间距的, 距离 d 计算公式见式 (7)。

$$d = \begin{cases} \sqrt{1 + k^2} & k < 1 \\ \sqrt{1 + (1/k)^2} & k \geq 1 \end{cases} \quad (7)$$

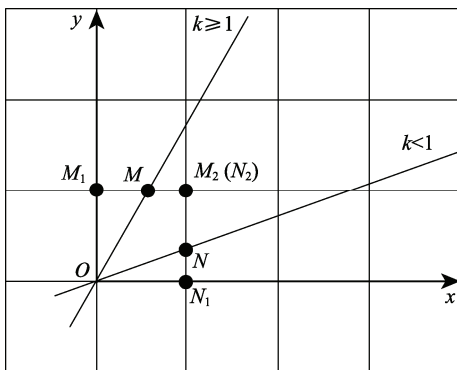


图 3 边缘点梯度方向的附近点的灰度插值

Fig.3 Gray interpolation of the neighborhood points of gradient directions of edge points

1.2.3 边缘点梯度方向灰度值的双曲正切拟合

高斯积分函数不存在解析解, 需要通过数值分析方法反复迭代计算, 它是影响算法执行效率的关键性

因素, 因此找到一个既能保证灰度值准确拟合又能快速求解的拟合函数至关重要。数学理论研究表明, 双曲正切函数的导数非常接近高函数, 因此用双曲正切函数替代高斯积分函数来简化运算, 采用此方法也克服了基于梯度幅值拟合对噪声敏感的缺点^[17]。 e^{-x^2} , $\tanh'(x)$, $\tanh(x)$ 曲线见图 4, 可以发现双曲正切函数的导数非常逼近于高斯函数。

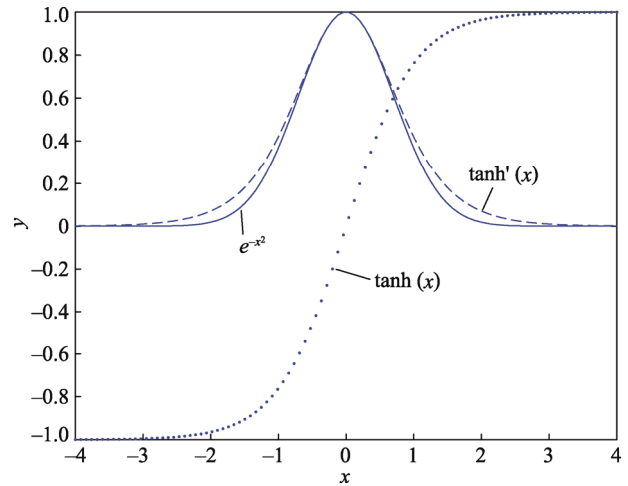


图 4 e^{-x^2} , $\tanh'(x)$, $\tanh(x)$ 曲线

Fig.4 e^{-x^2} , $\tanh'(x)$, $\tanh(x)$ curve

双曲正切边缘模型见式 (8), $I(x)$ 为 x 处的灰度值, h 为背景灰度值, k 为边缘和背景的灰度差值, p 为模糊因子, R 为边缘位置。

$$I(x) = -\frac{k}{2} \tanh(p(x - R)) + h + \frac{k}{2} \quad (8)$$

双曲正切函数属于非线性函数, 也无法通过变量替换转化为线性函数应用公式直接求解, 需借助于数值分析的方法, 通常求解非线性函数拟合问题的方法有高斯-牛顿法、共轭梯度法和单纯形法等。拟合本质上皆为最小二乘法的思想, 每种方法都有其适用的场合。这里选用最为常用的高斯-牛顿法来求解。背景灰度值 h , 边缘和背景灰度差值 k 可以由图像边界信息直接得到, 运用拟合算法求解得到 p 和 R , 其中 R 为待求的亚像素边缘位置。

以梯度方向为 x 轴, 过整像素点且垂直梯度方向为 y 轴建立坐标系。某整像素点梯度方向的 7 个临近点坐标为 (x_i, y_i) , 其中 $x_i = i \times d$ 表示到边缘整像素点的距离, y_i 表示灰度值 ($i = -3, -2, \dots, 3$)。对于回归模型见式 (8), 7 组数据的残差见式 (9)。

$$\delta_i = I(x_i) - y_i \quad (9)$$

拟合的思想是使残差平方和最小, 即:

$$\min \sum_{i=-3}^3 (\delta_i^2) \quad (10)$$

运用高斯-牛顿法确定亚像素边缘位置为 $x=R$ 。

1.3 最小二乘法圆拟合

亚像素边缘点确定以后,对亚像素边缘点进行圆拟合确定圆心 (x_c, y_c) ,圆的一般方程可表示为:

$$f(p, q) = x^2 + y^2 + Dx + Ey + F = 0 \quad (11)$$

式中: $p = [1, 1, D, E, F], q = [x^2, y^2, x, y, 1]$ 。

引入约束 $\|p\|=1$,建立目标函数:

$$F(p) = \sum_{i=1}^N f(p, q_i)^2 + M(\|p\|^2 - 1)^2 \quad (12)$$

式中: M 为惩罚因子,运用高斯-牛顿求解得到 p 。

圆心坐标为:

$$\begin{cases} x_c = -\frac{D}{2} \\ y_c = -\frac{E}{2} \end{cases} \quad (13)$$

2 评定实验

在配置为 Intel i7、主频 3.2 GHz 的处理器、8 G 金士顿内存的计算机上,对尺寸为 6 mm×6 mm,圆点分布为 7×7,圆心距为 0.75 mm,圆点直径为 0.375 mm,精度为±1 μm 的圆点标定板进行特征提取实验,见图 5。建立以标定板中心点为原点,水平方向为 x 轴,竖直方向为 y 轴的坐标系。运用文中提出的亚像素边缘提取算法提取出右上角的 9 个圆心坐标,并与文献[6—8]提出的算法从精度和运算效率 2 个方面对

比给出评定结果。

实验首先采用标准件进行系统标定从而获取尺度因子,即标准件的实际标准尺寸与图像像素个数的对应关系,通过实验计算得到该视觉系统的尺度因子 $K=14.6 \mu\text{m}/\text{像素}$ 。

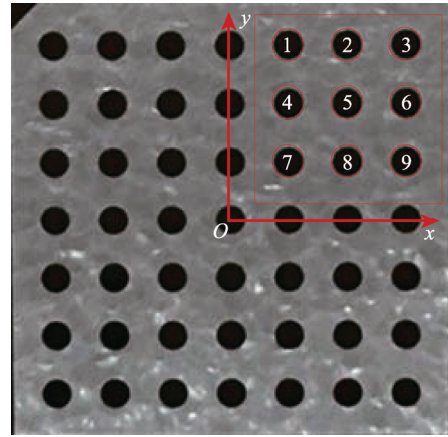


图 5 6 mm×6 mm 圆点标定板
Fig.5 6 mm×6 mm dot calibration board

定位精度评价:对标记 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 的 9 个圆提取其圆心坐标为 (x_{mi}, y_{mi}) ,实际圆心坐标为 (x_{ri}, y_{ri}) ,偏差记为 (x_{ei}, y_{ei}) ,其中 $x_{ei}=x_{mi}-x_{ri}, y_{ei}=y_{mi}-y_{ri}$ 。定位精度 $P_A = \pm \frac{1}{9} \sum_{i=1}^9 (|x_{ei}| + |y_{ei}|)$,实验数据见表 1。

表 1 定位精度实验数据
Tab.1 Experimental data of positioning accuracy

序号	实际位置	文中算法		文献[6]算法		文献[7]算法		文献[8]算法		μm
		测量位置	偏差	测量位置	偏差	测量位置	偏差	测量位置	偏差	
1	(750, 2250)	(751.26, 2251.32)	(1.26, 1.32)	(746.07, 2245.71)	(-3.93, -4.29)	(752.47, 2252.48)	(2.47, 2.48)	(748.77, 2251.25)	(-1.23, 1.25)	
2	(1500, 2250)	(1499.4, 2251.2)	(-0.53, 1.23)	(1501.65, 2246.00)	(1.65, -4.00)	(1498.96, 2252.31)	(-1.03, 2.31)	(1499.48, 2251.17)	(-0.52, 1.17)	
3	(2250, 2250)	(2251.6, 2251.7)	(1.69, 1.74)	(2244.73, 2244.35)	(-5.27, -5.65)	(2253.31, 2253.27)	(3.31, 3.27)	(2251.66, 2248.35)	(1.65, -1.65)	
4	(750, 1500)	(748.35, 1501.56)	(-1.65, 1.56)	(755.15, 1494.93)	(5.15, -5.07)	(746.77, 1502.93)	(-3.23, 2.93)	(748.38, 1501.48)	(-1.62, 1.48)	
5	(1500, 1500)	(1501.2, 1500.8)	(1.25, 0.87)	(1496.10, 1497.17)	(-3.90, -2.83)	(1502.45, 1501.64)	(2.45, 1.63)	(1501.23, 1499.17)	(1.23, -0.83)	
6	(2250, 1500)	(2251.2, 1498.5)	(1.20, -1.48)	(2246.26, 1504.81)	(-3.74, 4.81)	(2252.35, 1497.22)	(2.35, -2.78)	(2248.82, 1501.41)	(-1.18, 1.41)	
7	(750, 750)	(750.98, 751.24)	(0.98, 1.24)	(746.94, 745.97)	(-3.06, -4.03)	(751.92, 752.33)	(1.92, 2.33)	(749.04, 748.82)	(-0.96, -1.18)	
8	(1500, 750)	(1501.3, 749.34)	(1.30, -0.66)	(1495.94, 752.15)	(-4.06, 2.14)	(1502.55, 748.76)	(2.55, -1.24)	(1501.27, 749.37)	(1.27, -0.63)	
9	(2250, 750)	(2248.7, 749.56)	(-1.24, -0.44)	(2253.87, 751.43)	(3.87, 1.43)	(2247.57, 749.17)	(-2.43, -0.82)	(2248.78, 750.42)	(-1.22, 0.42)	
定位精度		±2.41		±7.66		±4.62		±2.32		

重复精度评价:连续 10 次提取标记为 1 的圆心坐标,圆心坐标为 (x_{mi}, y_{mi}) ,实际圆心坐标为(750, 2550),偏差记为 $(x_{ei}=x_{mi}-750, y_{ei}=y_{mi}-2250)$,重

复精度 $R_p = \pm \sigma, \sigma = \sqrt{\sum_{i=1}^{10} (x_{ei}^2 + y_{ei}^2) / 10 - 1}$,实验数据见表 2。

表 2 重复精度实验数据
Tab.2 Experimental data of repeatability precision

序号	实际位置	文中算法		文献[6]算法		文献[7]算法		文献[8]算法	
		测量位置	偏差	测量位置	偏差	测量位置	偏差	测量位置	偏差
1	(750, 2250)	(751.26, 2251.32)	(1.26, 1.32)	(753.15, 2253.04)	(3.15, 3.04)	(751.64, 2250.71)	(1.64, 0.71)	(752.56, 2251.51)	(2.56, 1.51)
2		(752.36, 2251.49)	(2.36, 1.49)	(755.90, 2253.43)	(5.90, 3.43)	(752.95, 2251.95)	(2.96, 1.95)	(751.74, 2251.78)	(1.74, 1.78)
3		(749.30, 2250.25)	(−0.70, 0.25)	(748.25, 2250.58)	(−1.75, 0.57)	(750.91, 2249.67)	(0.91, −0.33)	(752.85, 2251.01)	(2.85, 2.01)
4		(751.09, 2248.57)	(1.09, −1.43)	(752.73, 2246.71)	(2.73, −3.29)	(751.31, 2248.21)	(1.31, −1.79)	(752.44, 2249.76)	(2.44, −0.24)
5		(749.15, 2248.18)	(−0.85, −1.82)	(747.88, 2245.81)	(−2.13, −4.19)	(748.27, 2250.15)	(−1.73, 0.15)	(751.24, 2248.56)	(1.24, −1.44)
6		(748.82, 2249.52)	(−1.18, −0.48)	(747.05, 2248.90)	(−2.95, −1.10)	(749.93, 2251.36)	(−0.07, 1.36)	(751.04, 2250.71)	(1.04, 2.71)
7		(752.05, 2250.12)	(2.05, 0.12)	(755.13, 2250.28)	(5.12, 0.28)	(749.50, 2252.34)	(−0.50, 2.34)	(749.83, 2248.61)	(−0.17, −1.39)
8		(750.69, 2247.87)	(0.69, −2.13)	(751.73, 2245.10)	(1.73, −4.90)	(750.13, 2247.30)	(0.13, −2.70)	(748.60, 2252.71)	(−1.4, −0.29)
9		(751.45, 2248.63)	(1.45, −1.37)	(753.63, 2246.85)	(3.63, −3.15)	(752.66, 2250.82)	(2.66, 0.80)	(749.31, 2251.45)	(−0.69, 1.45)
10		(752.56, 2250.54)	(2.56, 0.54)	(756.40, 2251.24)	(6.40, 1.24)	(750.83, 2250.38)	(0.83, 0.381)	(751.57, 2248.98)	(1.57, −1.02)
重复精度		±2.12		±5.14		±2.31		±2.48	

运算实时性评价：对标记 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 的 9 个圆提取其圆心坐标，记录每次的计算时间，求 9 次的平均运算时间作为评价该算法的实时性指标。

表 3 运算时间实验数据
Tab.3 Experimental data of operation time

序号	实际位置/ μm	运算时间/ms			
		文中算法	文献[6]算法	文献[7]算法	文献[8]算法
1	(750, 2250)	10.997	15.036	49.075	38.116
2	(1500, 2250)	11.006	14.479	51.540	37.848
3	(2250, 2250)	9.897	15.485	51.023	38.002
4	(750, 1500)	11.041	12.525	50.990	38.488
5	(1500, 1500)	10.568	13.257	50.765	37.746
6	(2250, 1500)	10.974	16.068	48.988	39.070
7	(750, 750)	11.142	19.892	49.452	38.101
8	(1500, 750)	9.986	12.379	50.004	37.918
9	(2250, 750)	9.925	14.010	50.580	35.478
平均运算时间/ms		10.615	14.792	50.269	37.863

从表 1—3 可知，文献[6]提出的算法，其运算效率较高，由于易受检测图像的灰度分布不均匀和噪声干扰的特点，所以精度较低；文献[7]提出的算法，其运算效率低，采用自适应阈值法，阈值不准可能是造成定位精度较低的原因；文献[8]提出的算法，其精度较高，由于采用大量的灰度插值和灰度查运算，所以运算效率较低；文中提出的算法在精度和实时性两方面的性能指标都很优越，相比文献[6]和文献[7]提出

的算法，文中算法的精度有了较大的提升，已经接近三坐标测量机的测量精度（1 ~ 2 μm ），相比文献[8]提出的算法，文中算法的实时性又得到了提升。

3 结语

针对标定板特征提取精度不高，提出了一种基于亚像素边缘的提取算法。首先采用 Canny 算子粗定位确定整像素级别边缘，3×3 窗口内确定整像素边缘梯度方向，然后在梯度方向上进行灰度插值，将梯度方向的灰度值按双曲正切函数拟合确定亚像素边缘位置，最后将亚像素边缘按照圆拟合确定圆心坐标。实验表明，该算法定位精度达到 2.41 μm ，重复精度达到 2.12 μm ，单个圆心特征提取耗时约 10 ms，与其他算法相比，精度较高，运算效率提升，有助于摄像机的标定。

参考文献：

[1] 刘国阳. 基于机器视觉的微小零件尺寸测量技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.
LIU Guo-yang. The Research of Dimonsion Measurements of Machine Vision[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014.

[2] 张立静. 应用于腹腔微创手术机器人立体视觉技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011.
ZHANG Li-jing. Research on Three-dimensional Visual Technology Applied to Minimally Invasive Celiac Surgery Robot[D]. Harbin: Harbin Institute of Tech-

- nology, 2011.
- [3] 刘俊琪. 基于图像识别的铝塑包装材料边缘检测[J]. 包装工程, 2017, 38(13): 154—158.
LIU Jun-qi. Edge Detection of Aluminum-plastic Packaging Materials Based on Image Recognition[J]. Packaging Engineering, 2017, 38(13): 154—158.
- [4] 王雪亮, 李洪伟. 基于二维标定板的摄像机标定[J]. 工业控制计算机, 2013, 26(1): 75—79.
WANG Xue-liang, LI Hong-wei. Calibration Based on Two-dimensional Calibration Board[J]. Industrial Control Computer, 2013, 26(1): 75—79.
- [5] 曹兵, 李文博, 张云波. 基于改进 Harris 角点算法的摄像机标定技术研究[J]. 计算机测量与控制, 2016, 24(5): 213—219.
CAO Bing, LI Wen-bo, ZHANG Yun-bo. Research of Camera Calibration Technique Based on Improved Harris Corner[J]. Computer Measurement & control, 2016, 24(5): 213—219.
- [6] NIGHTINGALE A M, GORDEYEV S. Shack-hartmann Wavefront Sensor Image Analysis: a Comparison of Centroiding Methods and Image-processing Techniques[J]. Optical Engineering, 2013, 52(7): 071413.
- [7] 夏瑞雪, 卢荣胜, 刘宁, 等. 基于圆点阵列靶标特征点坐标自动提取方法[J]. 中国机械工程, 2010(16): 1906—1910.
XIA Rui-xue, LU Rong-sheng, LIU Ning, et al. A Method of Automatic Extracting Feature Point Coordinates Based on Circle Array Target[J]. China Mechanical Engineering, 2010(16): 1906—1910.
- [8] 张虎, 达飞鹏, 邢德奎. 光学测量中椭圆圆心定位算法研究[J]. 应用光学, 2008, 29(6): 905—911.
ZHANG Hu, DA Fei-peng, XING De-kui. Algorithm of Center Location of Eclipse in Optical Measurement[J]. Journal of Applied Optics, 2008, 29(6): 905—911.
- [9] DUKE D, HONNERY D, SORIA J. A Comparison of Subpixel Edge Detection and Correlation Algorithms for the Measurement of Sprays[J]. International Journal of Spray & Combustion Dynamics, 2011, 3(2): 93—110.
- [10] 刘珂, 周富强, 张广军. 半径约束最小二乘圆拟合方法及其误差分析[J]. 光电子激光, 2006, 17(5): 604—607.
LIU Ke, ZHOU Fu-qiang, ZHANG Guang-jun. Radius Constraint Least Square Circle Fitting Method and Error Analysis[J]. Journal of Optoelectronics Laser, 2006, 17(5): 604—607.
- [11] 朱嘉, 李醒飞, 谭文斌, 等. 基于圆心约束最小二乘拟合的短圆弧测量[J]. 光学精密工程, 2009, 17(10): 2486—2491.
ZHU Jia, LI Xing-fei, TAN Wen-bin, et al. Measurement of Short Arc Based on Center Constraint Least-square Circle Fitting[J]. Optics and Precision Engineering, 2009, 17(10): 2486—2491.
- [12] 雒涛, 郑喜凤, 丁铁夫. 改进的自适应阈值 Canny 边缘检测[J]. 光电工程, 2009, 36(11): 106—111.
LUO Tao, ZHENG Xi-feng, DING Tie-fu. Improved Self-adaptive Threshold Canny Edge Detection[J]. Opto-engineering, 2009, 36(11): 106—111.
- [13] CANNY J. A Computation Approach to Edge Detection[J]. IEEE Trans Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1986, 8(11): 679—697.
- [14] 孙秋成, 孙维健, 徐中宇, 等. 基于反正切函数拟合的亚像素边缘检测算法[J]. 控制工程, 2017, 24(4): 905—908.
SUN Qiu-cheng, SUN Wei-jian, XU Zhong-yu, et al. Sub-pixel Edge Detection Algorithm Based on Arctangent Function Fitting[J]. Control Engineering of China, 2017, 24(4): 905—908.
- [15] YACENG S, JING C, JUNWEI T. The Research of the Measures Algorithm of the Parameter of the Cutter[J]. International Journal of Image Graphics & Signal Processing, 2011, 3(1): 45—52.
- [16] 郭海霞, 郭海龙, 解凯. 基于边缘信息改进的双线性插值算法[J]. 计算机工程与应用, 2011, 47(31): 171—174.
GUO Hai-xia, GUO Hai-long, XIE Kai. Improved Bilinear Interpolation Algorithm Based on Edge Information[J]. Computer Engineer and Application, 2011, 47(31): 171—174.
- [17] 马德明. 基于双切正切函数的边缘检测方法[D]. 长春: 吉林大学, 2011.
MA De-ming. Sub-pixel Detection Based on Hyperbolic Tangent[D]. Changchun: Jilin University, 2011.