

基于曲率与灰度复合的角点亚像素定位方法

丁艳蓉¹, 白瑞林¹, 倪健²

¹江南大学轻工过程先进控制教育部重点实验室, 江苏 无锡 214122;

²无锡信捷电气股份有限公司, 江苏 无锡 214072

摘要 针对轴类工件表面毛刺、油污等附着物对视觉测量中角点检测的干扰问题, 提出一种基于曲率与灰度复合的角点亚像素定位方法。该方法对图像感兴趣区域进行形态学和双边滤波预处理, 消除毛刺和部分油污等附着物; 根据曲率特性检测候选角点, 利用角点处曲率角的多尺度不变性进行伪角点的预筛选, 通过以角点为圆心的圆形窗口内灰度信息进一步排除伪角点, 实现角点粗定位; 根据粗定位角点和区域端点的连线, 对原始图像的边缘点进行筛选, 并对筛选后的边缘点进行最小二乘直线拟合, 实现角点精准定位。实验表明, 该方法有效克服了轴类工件表面附着物对角点检测的干扰问题, 角点综合定位的重复性达到 0.01 mm, 角点定位算法精度达到 0.004 mm, 基于角点的综合测量精度为 0.06 mm。

关键词 测量; 角点定位; 曲率; 附着物; 亚像素

中图分类号 TP391.4 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP55.031501

Sub-Pixel Corner Location Method Based on Curvature and Gray

Ding Yanrong¹, Bai Ruilin¹, Ni Jian²

¹Key Laboratory of Advanced Process Control for Light Industry (Ministry of Education), Jiangnan University, Wuxi, Jiangsu 214122, China;

²Xinje Electronic Co., Ltd., Wuxi, Jiangsu 214072, China

Abstract Aiming at the interference of the surface burrs, oil, and other attachments on the corner detection in the visual measurement, we propose a method of sub-pixel location based on curvature and gray. Firstly, we use a morphological and bilateral filtering method to eliminate burrs, oil, and other attachments in the region of interest. Secondly, we detect the candidate corners according to the curvature characteristics, pre-screen the false-corners by the multi-scale invariance of the curvature angle at the corner, and use the gray information in the circular window to further eliminate false-corners to achieve the corner of the rough positioning. Finally, we screen the edge point of the original image according to the connection between the coarse positioning corner and the regional end points, and fit the filtered edge points by using least squares fitting to achieve precise positioning of the corner point. The experimental results show that the method can effectively overcome the interference of the surface attachment of the workpiece surface. The repeatability of corner location reaches 0.01 mm, and the accuracy of corner location algorithm reaches 0.004 mm, and the comprehensive measurement accuracy based on corner points is 0.06 mm.

Key words measurement; corner location; curvature; attachment; sub-pixel

OCIS codes 150.0155; 120.6650; 100.2960; 040.1880

1 引言

轴类工件是工业中极为常见的旋转类工件,其

几何量测量的误差^[1]不仅直接影响机械的运动性能、使用寿命,还对减少能源消耗和环境污染等有重要影响。虽然基于机器视觉的测量方法^[2]比传统测

收稿日期: 2017-08-23; **收到修改稿日期:** 2017-09-18

基金项目: 江苏高校优势学科建设工程资助项目(PAPD)、江苏省产学研前瞻性联合研究项目(BY2015019-38)、江苏省科技成果转化专项资金项目(BA2016075)

作者简介: 丁艳蓉(1989—),女,硕士研究生,主要从事机器视觉理论与应用方面的研究。E-mail: vinkiding@163.com

导师简介: 白瑞林(1955—),男,硕士,教授,博士生导师,主要从事机器视觉与机器人技术方面的研究。

E-mail: saiwuxi@163.com

量方法具有非接触、精确、易于实现自动化等优点,但是该类方法的测量精度受待测工件表面的清洁度影响较大。工件在加工过程中不可避免地会产生边缘毛刺、油污、切削残留以及刀纹和工件材料本身引起的表面深浅不一的痕迹等附着物,这些都是影响工件表面粗糙度的重要因素。由此提取的工件轮廓必然存在众多伪角点,对真实角点的检测造成了很大干扰,从而使测量结果产生误差。因此,在有附着物存在的前提下,如何准确识别工件轮廓上的正确角点,已成为影响测量精度和稳定性的首要问题。

角点是指图像中边界曲线具有曲率极大值的点,在该点附近的灰度值会发生剧烈的变化。目前,国内外学者们提出了许多角点提取的算法,主要分为4类:基于灰度图像的角点检测算法、基于二值图像的角点检测算法、基于边缘特征的角点检测算法以及支持向量机角点检测算法,其中基于灰度图像和基于边缘特征的角点检测方法应用最为广泛^[3-4]。前者主要是通过检查图像局部灰度值的变化来检测角点,如 Harris^[5] 和 Susan^[6] 算法;后者是通过分析图像边缘轮廓特性来检测角点,提取图像的边缘轮廓,从边缘中提取封闭或非封闭的轮廓曲线,通过搜索轮廓线上的曲率值或利用多边形逼近查找交点来提取角点^[7-8],如 CSS 算法。但是 CSS 角点检测算法仍存在一些局限:1) 当尺度 σ 太大,会漏检角点,当尺度 σ 太小,又会误检角点;2) 局部曲率最大值得到的候选角点集可能是真实角点或者是圆角点的噪声。针对这些局限,文献[9]提出了直接基于曲率特性的自适应角点检测方法,该算法对于“平整”轮

廓的角点检测具有很好的效果,但是对于实际应用中相对“不平整”的轮廓,该方法在检测出真实角点的同时,也可将附着物附近的伪角点一并检测出来。此外,上述角点检测方法的定位精度只达到像素级,不能满足工业测量的精度要求,需要与亚像素技术结合,才能实现角点的精确定位。

针对轮廓附着物在角点检测过程中的干扰问题,本文提出了基于曲率与灰度复合的角点亚像素定位方法。通过对图像感兴趣区域进行形态学和双边滤波等预处理,消除毛刺和部分油污等附着物;针对附着物产生的伪角点问题,通过角点处曲率角的多尺度不变性和以角点坐标为圆心的圆形窗口内暗区面积占整个圆形窗口面积的比值,有效地排除伪角点;针对图像预处理后的边缘偏离真实边缘而影响角点定位准确性问题,以初定位的角点为基准,对原始图像提取的边缘点进行筛选,排除干扰点,通过最小二乘直线拟合方法^[10]实现角点的亚像素定位。该方法可有效地解决附着物的干扰问题,成功地避开预处理操作的不足,提高角点的定位精度。

2 算法原理

2.1 图像预处理

由于角点检测方法都是针对“整洁”图像,而实际工业现场采集的图像必然存在噪声干扰,如毛刺、油污等附着物,以及光路架设偏差导致的光晕,所以首先需要对图像感兴趣区域(ROI)进行预处理。本文以电机轴为例,如图1所示,具体图像预处理步骤如下。

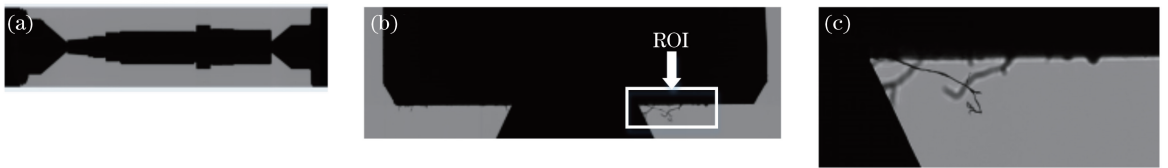


图1 测试系统获取的电机轴图像。(a)电机轴图像;(b)电机轴的局部图像;(c)局部(ROI)放大图

Fig. 1 Motor shaft images acquired by the test system. (a) Motor shaft image;

(b) partial image; (c) enlarged view of ROI

1) 对 ROI 进行形态学闭运算,有效地消除工件加工过程中产生的毛刺,并消除工件表面小尺度油污。形态学处理后的图像如图 2(a)所示。

2) 用双边滤波^[11]有效地保边去噪,双边滤波后的图像如 2(b)所示。双边滤波输出为

$$g(i, j) = \frac{\sum_{k, l} f(k, l) \omega(i, j, k, l)}{\sum_{k, l} \omega(i, j, k, l)}, \quad (1)$$

式中权重系数为

$$\omega(i, j, k, l) = \exp \left[-\frac{(i-k)^2 + (j-l)^2}{2\sigma_d^2} - \frac{|f(i, j) - f(k, l)|^2}{2\sigma_r^2} \right], \quad (2)$$

式中, (k, l) 为模板窗口的中心坐标, (i, j) 为模板窗口的其他系数的坐标, σ_d 为值域滤波的高斯函数的标准差, σ_r 为空间邻域滤波的高斯函数的标准差, $f(k, l)$ 和

$f(i, j)$ 分别为图像在点 (k, l) 和 (i, j) 的像素值。

3) 用一个标准差为 $1, 5 \times 5$ 模板的高斯滤波

器, 增强图像的对比度。高斯滤波后的图像如图 2(c) 所示。

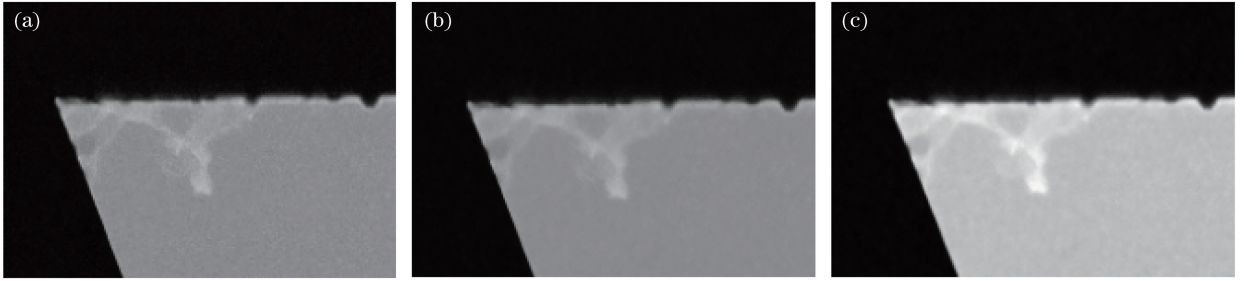


图 2 图像预处理的分步截图。(a)形态学处理;(b)双边滤波;(c)高斯滤波

Fig. 2 Partial screenshot of image preprocessing. (a) Morphological treatment; (b) bilateral filtering; (c) Gaussian filtering

利用上述预处理方法, 消除了毛刺和部分油污等附着物, 避免了伪边缘的干扰, 增强了图像的对比度, 有利于后续的角度提取。

2.2 角点粗定位

2.2.1 曲率角的定义和计算

如图 3 所示, 定义轮廓为 $L, L = \{P_1, P_2, \dots, P_N\}$, 其中 $P_i = (x_i, y_i)$ 为轮廓上各个点的像素坐标, 以轮廓点 P_i 为基准, 在轮廓 L 上找出距离点 P_i 为 R 的两个点, 记作 $S_i = \{P_{i-R}, P_i, P_{i+R}\}$, 分别将 P_{i-R} 和 P_{i+R} 与 P_i 相连, 得到两条直线段 $P_{i-R}P_i$ 和 P_iP_{i+R} 。这两条直线段构成的向量方向角分别为

$$\begin{cases} \theta_{R-}(i) = \arctan\left(\frac{y_i - y_{i-R}}{x_i - x_{i-R}}\right), \\ \theta_{R+}(i) = \arctan\left(\frac{y_{i+R} - y_i}{x_{i+R} - x_i}\right), \end{cases} \quad (3)$$

则点 P_i 处的曲率角 $\Delta\theta(i)$ 为

$$\Delta\theta(i) = \theta_{R+}(i) - \theta_{R-}(i), \quad (4)$$

式中 R 为曲率角计算的尺度, $\Delta\theta$ 为尺度 R 的曲率角。由上述定义可以看出, 对于同一个点 P_i 处的曲率角, 大小一般与所选取的两条直线 $P_{i-R}P_i$ 和 P_iP_{i+R} 有关, 其中两个端点的选取依赖于 R 的大小^[12]。

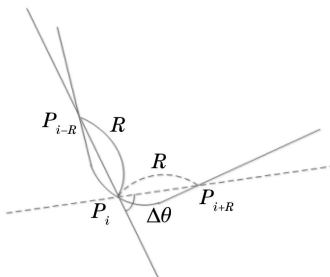


图 3 曲率角计算示意图

Fig. 3 Angle of curvature calculation diagram

2.2.2 伪角点与真实角点邻域圆形窗口内灰度面积比的差异和计算

如图 4(a) 所示, 当工件表面沾有附着物时, 红色十字表示可能被检测出来的伪角点 1, 2, 3。当附着物的尺度较大时, 将这 3 个伪角点分为两类, 一类是直线边缘上的伪角点, 包含伪角点 1, 3; 另一类是附着物边缘上的伪角点, 包含伪角点 2, 当附着物的尺度较小时, 可以将其归于第一类伪角点。通过观察伪角点 1, 2, 3 与真实角点周围像素的灰度分布规律可以发现, 以真实角点为圆心和以伪角点为圆心的圆形窗口内的暗区域面积占整个圆形窗口面积的比例有很明显的差异, 基于此特征可以排除伪角点。

当以真实角点为圆心时, 无论圆形窗口的半径如何变化, 窗口内的暗区域面积占整个窗口面积的比值保持不变。当以第一类伪角点为圆心, 如图 4(b) 所示, 圆形窗口的半径相对较大时, 附着物形成的暗区域相对整个圆形窗口的面积较小, 几乎忽略不计, 窗口内的暗区域面积占整个窗口面积的比值接近 0.5。当以第二类伪角点为圆心, 如图 4(c) 所示, 圆形窗口的半径较小时, 圆形窗口内包含的暗区域是附着物形成的区域, 其比值也接近 0.5。

以候选角点的坐标为圆心, 以一个小半径 r_1 和大半径 r_2 分别作圆 O_1 和 O_2 , 计算圆 O_1 和 O_2 内包含的暗区域的面积与圆面积的比值, 即

$$p_1 = 1 - \frac{\Delta H}{H_1} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{i=n} \sum_{j=1}^{j=m} \{I_{i,j}^{(1)} = 1\}}{\pi r_1^2}$$

$$p_2 = 1 - \frac{\Delta H}{H_2} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{i=n} \sum_{j=1}^{j=m} \{I_{i,j}^{(2)} = 1\}}{\pi r_2^2}, \quad (5)$$

式中, n 为图像的行数, m 为图像的列数, $I_{i,j}^{(1)}$ 和 $I_{i,j}^{(2)}$

为像素点的灰度值, $I^{(1)}$ 为原图与只含有圆 O_1 且与原图大小一致的二值图像(圆内灰度值为 1, 背景灰

度值为 0) 相乘后的图像, 同理, $I^{(2)}$ 为原图与含有圆 O_2 的二值图像相乘后的图像。

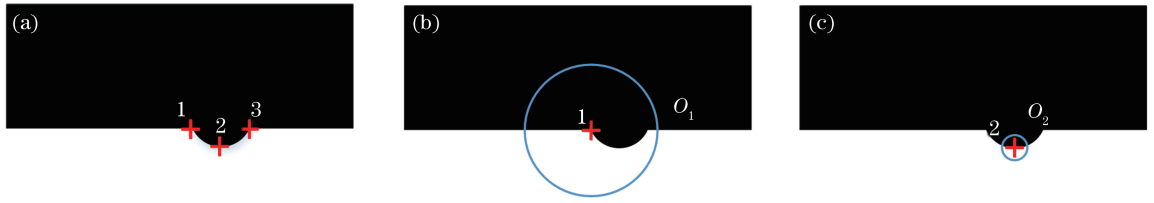


图 4 工件表面的伪角点类型及其圆形窗口的灰度信息。(a) 伪角点类型; (b) 伪角点 1 或 3 圆形窗口灰度信息; (c) 伪角点 2 圆形窗口灰度信息

Fig. 4 False-corner type on the workpiece surface and the gray information of its circular window. (a) False-corner type; (b) circular window gray information of false-corner 1, 3; (c) circular window gray information of false-corner 2

2.2.3 改进的角点检测算法

针对实际应用中经常检测出图像边缘轮廓上伪角点问题, 提出了改进的角点检测方法。该方法主要优势体现在可消除附着物产生的伪角点。由于实际待检测角点均为尖角点, 基于上述曲率角的定义可以发现, 当尺度 R 变化时, 真实角点的曲率角几乎保持不变, 所以利用真实角点处的曲率角在多尺度下的不变性来进行角点预筛选, 主要消除真实角点附近的伪角点; 再利用角点附近的灰度信息对角点进一步筛选, 消除距离真实角点一定距离的大尺度附着物产生的伪角点, 从而实现角点的粗定位。具体步骤如下。

1) 对预处理后的图像使用 Canny 算子进行边缘检测, 获得一个二值边缘图, 当边缘到达端点时, 如果端点几乎连接到另一端点, 则填充间隙并继续提取, 以此类推, 最终得到一条连续的轮廓。通过判断该轮廓的起点和终点是否接近来定义轮廓的类型。如果不接近, 则定义该轮廓为开放轮廓; 反之, 则定义该轮廓为封闭轮廓。

2) 在一个固定的低尺度下, 通过计算步骤 1) 获得轮廓的曲率, 以保留真实角点, 并以局部极大值点作为候选角点 A_i , 曲率 $\rho_i^{(j)}$ 为

$$\rho_i^{(j)} = \frac{\Delta x_i^{(j)} \Delta^2 y_i^{(j)} - \Delta^2 x_i^{(j)} \Delta y_i^{(j)}}{[(\Delta x_i^{(j)})^2 + (\Delta y_i^{(j)})^2]^{1.5}}, \quad (6)$$

式中 $i=1, 2, \dots, N$, $\Delta x_i^{(j)} = (x_{i+1}^{(j)} - x_{i-1}^{(j)})/2$, $\Delta y_i^{(j)} = (y_{i+1}^{(j)} - y_{i-1}^{(j)})/2$, $\Delta^2 x_i^{(j)} = (\Delta x_{i+1}^{(j)} - \Delta x_{i-1}^{(j)})/2$, $\Delta^2 y_i^{(j)} = (\Delta y_{i+1}^{(j)} - \Delta y_{i-1}^{(j)})/2$ 。

3) 利用角点处曲率角的多尺度不变性进行伪角点的预筛选, 排除真实角点附近的伪角点。依次选择尺度 $R^{(1)}, R^{(2)}, \dots, R^{(j)}$, 根据(3)式和(4)式计算 A_i 在不同尺度下的曲率角 $\Delta\theta_i^{(j)}$, 对于任一个 $R^{(j)}$ 都有 $\Delta\theta_i^{(j)} > \Delta T_1$ 时其中 ΔT_1 是指各个尺度 $R^{(j)}$ 下

的初步阈值, 将候选角点标记为 P_i , 依次得到不同尺度 $(R^{(1)}, R^{(2)}, \dots, R^{(j)})$ 所对应的候选角点集合 $D^{(j)}$, 则 $D^{(j)} = \{P_i | \Delta\theta_i^{(j)} > \Delta T_1, i=1, 2, \dots, N; j=1, 2, \dots\}$ 。进一步判断 $D^{(j)}$ 在不同尺度下曲率角的偏差值是否小于阈值 M , 如果成立, 则存入候选角点集合 D' 中, $D' = \{P_i | P_i \in D^{(j)}, \max(|\Delta\theta_i^{(j)} - \Delta\theta_i^{(k)}|) < M, j, k=1, 2, \dots, j \neq k\}$ 。

4) 通过伪角点与真实角点邻域圆形窗口灰度面积差异进一步筛选距离真实角点一定距离的附着物产生的伪角点。根据(5)式计算候选角点在 r_1 和 r_2 的 $P_i^{(1)}, P_i^{(2)}$ 。通过判断候选角点的 $P_i^{(1)}, P_i^{(2)}$ 是否分别满足阈值范围, 如果满足, 则确定为真实角点存入 D'' 中, $D'' = \{P_i | P_i \in D', t_1 < P_i^{(1)} < t_2 \text{ or } t_1 < P_i^{(2)} < t_2\}$ 。

5) 根据本文的研究对象所提取的轮廓特点, 可知步骤 1) 的判断结果均为开放轮廓。进一步判断开放轮廓的起点和终点是否接近于真实角点, 如果均不接近, 则标记轮廓的起点和终点为轮廓端点, 反之, 则放弃标记。

2.3 角点的亚像素定位

角点的初定位, 仅获得角点的像素级坐标位置, 而对于精密测量领域, 精度需要达到亚像素级别。考虑到图像预处理或多或少会丢失图像的真实边缘, 影响最终的测量精度, 为了使测量结果更真实准确, 需要对原始图像进行边缘检测, 但是由此带来了许多干扰边缘和噪声点。因此, 通过结合 2.2 节角点检测方法和几何定位思想的角点检测法来保证直线提取的精度。首先将 2.2 节的初定位角点分别与轮廓端点相连, 以此为基准, 对原始图像的边缘点进行筛选, 从而得到构成直线边缘的两个点集; 其次通过最小二乘直线拟合法获得两条精确的直线; 最后求两条直线的交点, 即为角点。

具体实现步骤如下。

1) 利用上述步骤得到的待检测角点坐标分别与轮廓的两个端点相连得到两条直线 l_1 和 l_2 。

2) 通过 Canny 算子对原始图像进行边缘提取, 以直线 l_1 和 l_2 为基准, 分别计算边缘点到这两条直线的距离 $d_1(i)$ 和 $d_2(i)$ 。再通过分别比较 $d_1(i)$ 和 $d_2(i)$ 与阈值 t 对边缘点进行筛选, 剔除大于阈值 t 的边缘点, 保留小于阈值 t (t 取 $1.5 \sim 2$) 的边缘点至点集 D_1 和 D_2 , 由此得到了关于待检测角点且排除了各种噪声干扰的两条直线的点集。

3) 分别对点集 D_1 和 D_2 用最小二乘直线拟合得到两条直线 L_1 和 L_2 , 最后得到两条直线的交点, 即为角点。

3 实验与分析

为了验证本文方法的有效性, 搭建了轴类光学测量系统。该系统主要由一台 12K 分辨率的 basler 线阵相机^[13]、一个远心镜头和与镜头配套的平行背光、光栅尺、两台电机及一台计算机等构成, 如图 5 所示。该系统可检测的最大视野为 $40 \text{ mm} \times 370 \text{ mm}$ 。

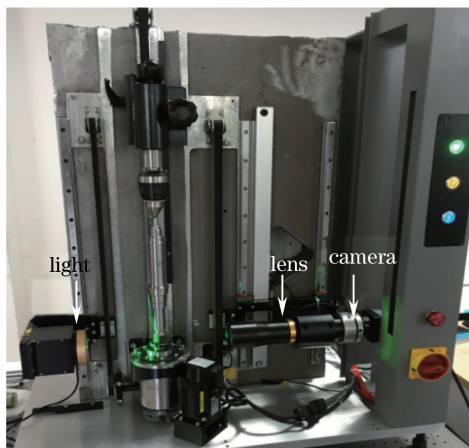


图 5 轴类光学测量系统

Fig. 5 Shaft type optical measurement system

实验准备阶段: 按照图 5 搭硬件平台, 采用标准棋盘格作为标定参照物, 标定出一个像素的实际物理尺寸, 本文中实际物理尺寸 $k = 0.007 \text{ mm}$; 测量准备阶段: 手动标记并记录角点、直线所属的感兴趣区域, 从而实现几何量的自动测量; 测量阶段: 使相机和光源同步运动, 从工件的底端运动至工件顶端, 在运动过程中, 相机完成整个工件的图像采集, 然后将图像传输给计算机, 根据事先记录的感兴趣区域并按照本文方法处理图像自动检测角点, 最后得到待测量尺寸, 如图 6 所示。

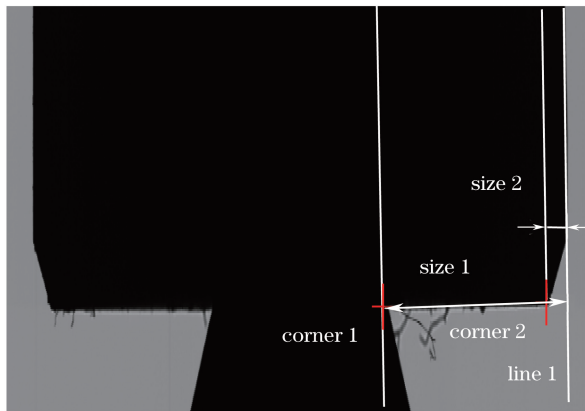


图 6 待检测的角点和尺寸

Fig. 6 Corner and size to be detected

3.1 改进算法的实验结果

通过对预处理后的图像进行 2.2.4 节中所述的步骤 1) 和步骤 2), 其结果如图 7 所示。由图 7 可以看出, 所得候选角点存在 12 个伪角点 (2~13), 所以需要按照 2.2.4 节的步骤 3) 对伪角点进行排除。本次实验的尺度从 8 变化到 25, 计算各个候选角点在不同尺度下的曲率角。由于 12 个候选角点可以分为 3 类伪角点, 第 1 类是在真实角点附近的伪角点, 如 2, 3, 4; 第 2 类是距离真实角点一定距离的附着物引起的直线边缘上的伪角点, 如 5, 6, 7, 8, 9, 10, 13; 第 3 类是距离真实角点一定距离的附着物边缘上的伪角点, 如 11 和 12, 因此实验结果只截取了具有代表性的伪角点 (2, 9, 12) 和真实角点在不同尺度下的曲率角, 结果如图 8 所示, 横坐标为尺度 R , 纵坐标为曲率值 ρ 。计算尺度 R 在 $8 \sim 25$ 变化时各个候选角点的曲率角的最大绝对误差, 结果如表 1 所示。由图 8 可知, 真实角点在不同尺度下的曲率角几乎保持不变, 而伪角点的曲率角差异较大, 依据经验和多次实验分析, 取阈值 $M = 15$ 。由图 7 和表 1 可知, 真实角点被保留, 伪角点 2 可被稳定地去除,

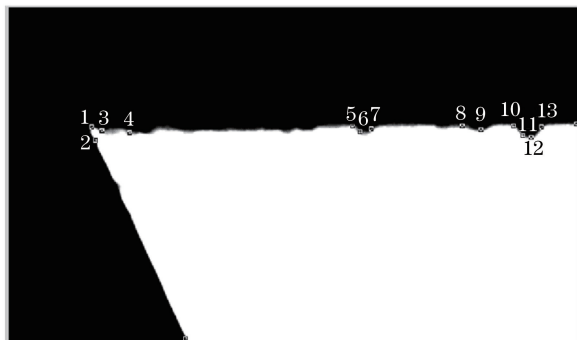


图 7 候选角点截图

Fig. 7 Candidate corner screenshots

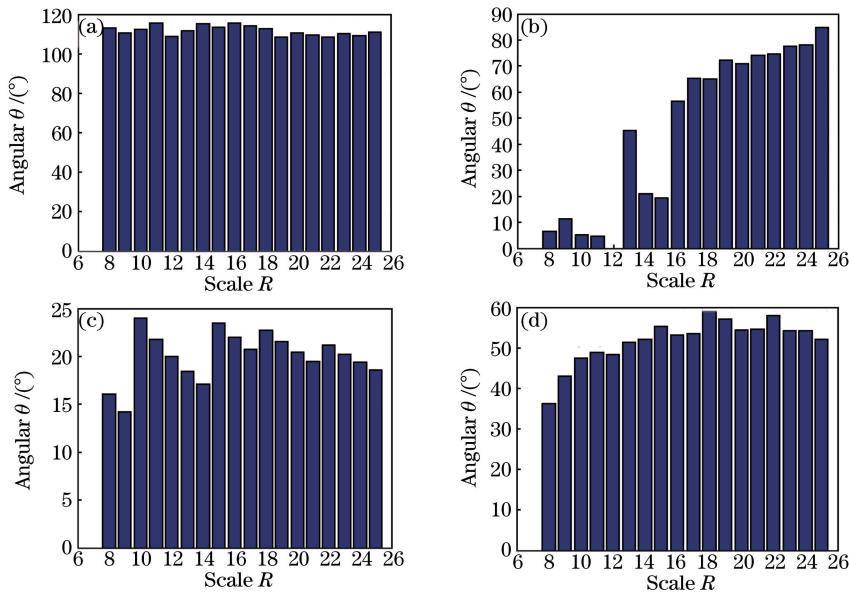


图8 部分候选角点在不同尺度下的曲率角分布。(a)真实角点;(b)伪角点2;(c)伪角点9;(d)伪角点12

Fig. 8 Angular distribution of the corners at different scales. (a) Angle of curvature of the true corner;

(b) angle of curvature of the corner 2; (c) the angle of curvature of the corner 9; (d) the angle of curvature of the corner 12

表1 部分候选角点的曲率角绝对偏差值

Table 1 Absolute deviation of the curvature angle of partial candidate corners

Partial candidate corner	True corner	False-corner 2	False-corner 9	False-corner 12
Absolute deviation of curvature angle / ($^{\circ}$)	7.0231	84.8056	9.7466	22.0407

伪角点12虽然在阈值范围之内,但是受经验阈值的限制,而伪角点9的最大偏差值低于15,不能被排除,所以该步骤有效去除了真实角点附近的伪角点,对于距离真实角点一定距离的附着物产生的伪角点的排除具有不确定性,需要根据2.2.4节的步骤4)进一步去除伪角点9和12。

按照2.2.4节的步骤4)操作,由于伪角点的 $p_i^{(1)}$ 和 $p_i^{(2)}$ 至少有一个值接近于0.5,参数阈值 t_1 取0.4, t_2 取0.6。计算伪角点9,12和真实角点在不同半径下的灰度比值,结果如表2所示。由表2可知,真实角点在不同半径下的 $p_i^{(1)}$ 和 $p_i^{(2)}$ 均大于0.6;而伪角点9,10的 $p_i^{(2)}$ 均在0.4~0.6内。因此真实角点被保留,伪角点被排除。

表2 真实角点以及伪角点9,12的 $p_i^{(1)}$ 和 $p_i^{(2)}$

Table 2 $p_i^{(1)}$ and $p_i^{(2)}$ of the true corner and corners 9 and 12

Candidate corners	True corner	False-corner 9	False-corner 12
$p_i^{(1)}$	0.8629	0.5849	0.664
$p_i^{(2)}$	0.832	0.4821	0.557

通过2.2.4节的步骤,实现了角点的粗定位,最后按照2.3节对粗定位结果进行精确定位,结果如图9所示。

文献[9]中角点检测方法的实验结果如图10(a)所示,从图中可以看出,检测结果包含了很多伪角点,且定位精度为像素级,而本文方法准确地检测出真实角点,且定位精度达到亚像素等级。因此,与文献[9]中的角点检测方法相比,本文方法在去除伪角点和提高精度方面具有明显的优势,更适用于实际工业应用。此外,相比文献[12],本文方法只计算候选角点在不同尺度下的曲率角,无须计算整个轮廓点在不同尺度下的曲率角,处理时间上有明显提高,而且该方法利用圆形窗口代替矩形窗口,避免了因工件方向不同而导致的错误判断,更具有通用性。

3.2 重复性、定位精度和测量精度结果

为了验证轴类测量系统和本文角点定位算法的综合稳定性,首先对同一个工件取放条件下采集9组图像,使用本文角点定位方法,对9组图像中的Corner 1和Corner 2进行检测,如图6所示,每次检测结果见表3。由表3可知,Corner 1和Corner 2的9组数据的绝对偏差值均在0.01 mm以内,由于工件的横向方向的过渡像素较少,其对比度更高,因此其检测的重复性约为0.006 mm,而工件的纵向方向的过渡像素较多,其对比度偏低,因此其检测的重复性约为0.01 mm。

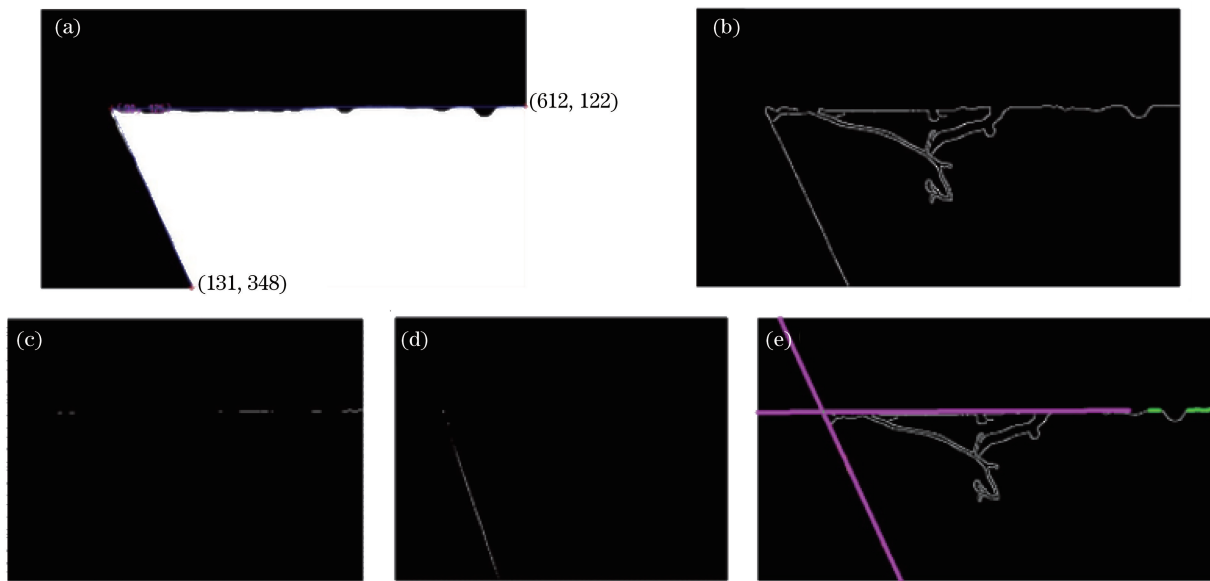


图9 亚像素定位的分步结果截图。(a)连接角点和端点;(b)边缘提取;(c)点集1;(d)点集2;(e)直线拟合并相交
 Fig. 9 Sub-pixel positioning step-by-step results screenshot. (a) Corner and endpoint connection; (b) edge extraction; (c) line point set 1; (d) line point set 2; (e) straight line fitting and intersection

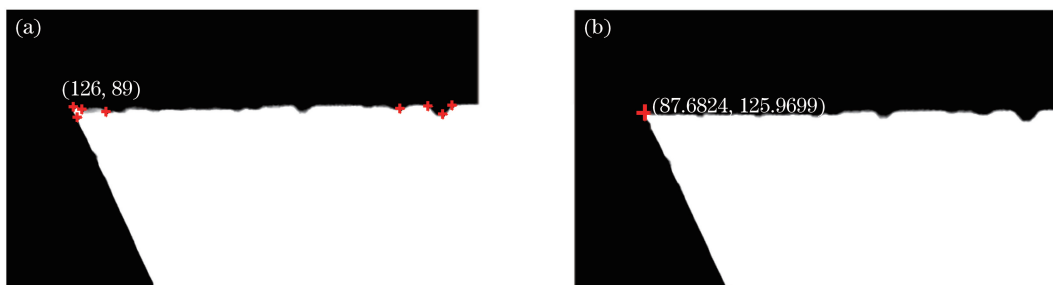


图10 角点检测结果。(a)参考文献[9]的检测结果;(b)本文的检测结果
 Fig. 10 Corner detection results. (a) Result in Ref. [9]; (b) results in this paper

表3 单个工件取放重复性检测结果

Table 3 Duplicate test results for individual artifacts

mm

Index	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Absolute deviation
Corner 1_X	24.7809	24.7805	24.7826	24.7814	24.7818	24.7777	24.7822	24.7826	24.7836	0.0059
Corner 1_Y	2.4974	2.4996	2.5067	2.4996	2.5069	2.5056	2.5012	2.5005	2.5050	0.0094
Corner 2_X	30.6974	30.6944	30.6981	30.6982	30.6945	30.6937	30.6961	30.6950	30.6992	0.0055
Corner 2_Y	2.4585	2.4522	2.4525	2.4593	2.4607	2.4541	2.4609	2.4611	2.4598	0.0089

为了进一步验证本文角点定位算法的精度,本文对同一个工件静态条件下采集8组图像,使用本文角点定位方法,对8组图像中的Corner 1和Corner 2进行检测,并与角点的真实坐标进行比较,每次检测结果见表4。由表4可知,Corner 1和Corner 2的各8组数据与真实值的最大偏差值为0.004 mm以内,定位精度约为0.6 pixel。

为了进一步验证轴类测量系统的综合测量精

度,随机抽取了3个工件作为待测件,分别测量每个待测件如图6中尺寸Size 1和Size 2,并分别与真实值比较,数据记录见表5,其中Size 1为Corner 1到Line 1的垂直距离,Size 2为Corner 2到Line 1的垂直距离。由表5可知,通过对3个工件的6组尺寸的测量,检测精度达到0.06 mm,能够满足电机轴的±0.07 mm的公差要求,检验结果可靠。

表4 算法精度检测结果

Table 4 Algorithm accuracy test results

mm

Corner	Value	1	2	3	4	5	6	7	8
Corner 1_X	Detection value	24.7729	24.7755	24.7764	24.7760	24.7756	24.7768	24.7762	24.7753
	Actual value	24.7734	24.7734	24.7734	24.7734	24.7734	24.7734	24.7734	24.7734
	Absolute deviation	0.0005	0.0021	0.0030	0.0026	0.0022	0.0034	0.0028	0.0019
Corner 1_Y	Detection value	2.4891	2.4898	2.4919	2.4891	2.4932	2.4909	2.4935	2.4896
	Actual value	2.4899	2.4899	2.4899	2.4899	2.4899	2.4899	2.4899	2.4899
	Absolute deviation	0.0008	0.0001	0.0020	0.0008	0.0033	0.0010	0.0036	0.0003
Corner 2_X	Detection value	30.7154	30.7138	30.7145	30.7173	30.7153	30.7148	30.7171	30.7151
	Actual value	30.7161	30.7161	30.7161	30.7161	30.7161	30.7161	30.7161	30.7161
	Absolute deviation	0.0007	0.0023	0.0016	0.0012	0.0008	0.0013	0.0010	0.0010
Corner 2_Y	Detection value	2.4304	2.4277	2.4288	2.4284	2.4316	2.4313	2.4319	2.4313
	Actual value	2.4282	2.4282	2.4282	2.4282	2.4282	2.4282	2.4282	2.4282
	Absolute deviation	0.0022	0.0005	0.0006	0.0002	0.0034	0.0031	0.0037	0.0031

表5 多个工件检测结果

Table 5 Multiple workpiece detection results

mm

Value	Size 1 of piece 1	Size 2 of piece 1	Size 1 of piece 2	Size 2 of piece 2	Size 1 of piece 3	Size 2 of piece 3
Measured value	6.3370	0.4222	5.7021	0.6672	2.1935	0.3744
Actual value	6.3570	0.4310	5.7450	0.6670	2.1440	0.3170
Absolute deviation	0.02	0.0088	0.0431	0.0002	0.0495	0.00574

4 结 论

深入研究角点精确定位,并将其应用在轴类工件精密测量技术领域,可得以下结论。

1) 针对附着物产生的伪角点对真实角点检测干扰问题,提出了改进的角点检测算法,实验表明,该方法可以有效地去除伪角点。

2) 针对计算所有边缘轮廓点在各个尺度下的曲率角会导致计算量增大的问题,本文提出的方法无须计算整个轮廓点在不同尺度下的曲率角,只需计算候选角点在不同尺度下的曲率角,极大地缩短了算法时间,提高了系统的实时性。

3) 针对“不平整”图像的角点精确定位难的问题,提出了将角点检测方法和几何测量法结合的思想,该方法不仅可实现角点亚像素定位,且所得角点更接近于真实角点。

4) 实验结果表明,应用轴类测量系统和角度检测算法的综合定位的重复性达到 0.01 mm,角点定位算法精度达到 0.004 mm,基于角点的综合测量精度为 0.06 mm,满足电机轴的 ± 0.07 mm 的公差要求。

参 考 文 献

[1] Gan Y L. Geometric tolerance and measurement

[M]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 2013: 6-28.

甘永立. 几何量公差与测量[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 2013: 6-28.

[2] Tian Y Y, Huang H C, Tan Q C, *et al.* Size measurement of parts based on machine vision[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2010, 47(1): 011501.

田原嫫, 黄合成, 谭庆昌, 等. 基于机器视觉的零件尺寸测量[J]. 激光与光电子学进展, 2010, 47(1): 011501.

[3] Zhang W C, Kong X N, Song W. Review of image corner detection algorithms[J]. Acta Electronica Sinica, 2015, 43(11): 2316-2318.

章为川, 孔祥楠, 宋文. 图像的角点测量研究综述[J]. 电子学报, 2015, 43(11): 2316-2318.

[4] Shen X J, Cheng M J, Xiao J J, *et al.* Corner detection for fisheye checkerboard images based on iterative correction[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53(9): 091501.

申夏晶, 程梦娇, 肖江剑, 等. 基于迭代校正的鱼眼棋盘格图像角点检测[J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(9): 091501.

[5] Ryu J B, Park H H, Park J. Corner classification using Harris algorithm[J]. Electronics Letters, 2011, 47(9): 536-538.

- [6] Ye B H, Xu D, Jiang Y P, *et al.* An improved SUSAN corner detection method [J]. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2010, 8(1): 47-51.
叶伯洪, 徐杜, 蒋永平, 等. 一种改进的 SUSAN 角点提取方法 [J]. *光学与光电技术*, 2010, 8(1): 47-51.
- [7] Kim S. Robust corner detection by image-based direct curvature field estimation for mobile robot navigation [J]. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 2012, 9(6): 700-709.
- [8] Zhang S Z, Yang D, Huang S, *et al.* Corner detection using Chebyshev fitting based continuous curvature estimation [J]. *Electronics Letters*, 2015, 51(24): 1988-1990.
- [9] Liao B, Sun H Y, Xu J G. Adaptive corner detection based on direct curvature scale space [J]. *Applied Mechanics & Materials*, 2013, 391: 488-492.
- [10] Clarke A J, van Gorder S. On fitting a straight line to data when the "Noise" in both variables is unknown [J]. *Journal of Atmospheric & Oceanic Technology*, 2013, 30(1): 151-158.
- [11] Chaudhury K N, Dabhade S D. Fast and provably accurate bilateral filtering [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2016, 25(6): 2519-2528.
- [12] Zhang H, Wei J G, Wu Z Q, *et al.* A method of detection on multi-scale angle of curvature and the proportion of gray level [J]. *Journal of Donghua University (Natural Science Edition)*, 2015, 41(4): 416-420.
张辉, 韦建光, 吴卓琦, 等. 多尺度曲率角与比例复合的角点检测方法 [J]. *东华大学学报(自然科学版)*, 2015, 41(4): 416-420.
- [13] Di C L, Yan W, Hu S, *et al.* Research on adaptive width measuring method of cut tobacco and its application [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2014, 41(7): 0708004.
邸成良, 严伟, 胡松, 等. 自适应烟丝宽度测量方法及其应用研究 [J]. *中国激光*, 2014, 41(7): 0708004.