

DOI: 10.13382/j.jemi.B2205322

改进 Canny 算子下的工件尺寸测量*

赵朝朝^{1,2} 江明^{1,2} 殷宗琨^{1,2}

(1. 安徽工程大学高端装备先进感知与智能控制教育部重点实验室 芜湖 241000;

2. 安徽工程大学电气工程学院 芜湖 241000)

摘要:针对人工用游标卡尺测量手工捏花尺寸效率低下的问题,提出一种改进的自适应 Canny 算子测量手工捏花尺寸的方法。首先,引入均值漂移法分割图像,图像颜色变得渐变、细纹纹理平缓;其次,用大致轮廓的平均像素值选择性的替代边缘检测的高阈值,以达到较好的自适应提取边缘的目的;再次,scharr 算子代替 sobel 算子,增强了弱边缘的提取能力;最后,去掉小型连通域并且用主成分分析方法(PCA)获取轮廓的主方向,求取主方向直线方程,通过轮廓点在该直线上的最大投影距离获得捏花的长度,轮廓点在该直线的垂直方向上的最大投影距离获得捏花的宽度。实验表明,在对不规则物体的识别率上,本文方法比其他方法有着显著的提升,准确率达到 97%,与真实值误差 2 mm 左右,并且通过强光、弱光、侧面光实验对比分析,该方法受光照影响较小,满足工业自动化需求。

关键词: Canny; 均值漂移; 尺寸测量; 主成份分析

中图分类号: TP29; TN06 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.4050; 510.8060

Workpiece size measurement under improved Canny operator

Zhao Zhaozhao^{1,2} Jiang Ming^{1,2} Yin Zongkun^{1,2}

(1. Key Laboratory of Advanced Perception and Intelligent Control of High-end Equipment, Ministry of Education, Anhui Polytechnic University, Wuhu 241000, China; 2. School of Electrical Engineering, Anhui Polytechnic University, Wuhu 241000, China)

Abstract: Aiming at the low efficiency of measuring the size of a manual pinch with a vernier caliper, an improved adaptive Canny operator is proposed to measure the size of a manual pinch. Firstly, the mean shift method is introduced to segment the image, and the image color becomes gradual and the fine grain texture is gentle. Secondly, the average pixel value of approximate contour is selectively used to replace the high threshold of edge detection, to achieve the purpose of better adaptive edge extraction. Thirdly, Scharr operator replaces Sobel operator to enhance the ability of weak edge extraction. Finally, the small connected domain is removed, and the principal direction of the contour is obtained by principal component analysis (PCA), and the straight-line equation of the principal direction is obtained. The length of the pinch is obtained by the maximum projection distance of the contour point on the straight line, and the width of the pinch is obtained by the maximum projection distance of the contour point in the vertical direction of the straight line. Experiments show that this method has significantly improved the recognition rate of irregular objects more than other methods, with an accuracy of 97% and an error of about 2 mm from the real value. Through the comparative analysis of strong light, weak light and sidelight experiments, this method is less affected by light and meets the needs of industrial automation.

Keywords: Canny; mean-shift; dimension measurement; PCA

0 引言

手工捏花是我国非物质文化遗产,被称之为“永不凋

零的玫瑰”,受到了广大群众的追捧,有着不错的商业前景。工人在用粘土制作时,成品尺寸难免会大小不一,为了挑选合格的产品即尺寸误差在一定范围内,往往会用游标卡尺进行测量。而粘土制品在未用高温烧制之前,

质地柔软细腻,人工测量手段易毁坏产品且效率低下。随着产业的不断扩大,对产量需求不断升高,需要机器来代替人工进行检测^[1]。边缘检测的好坏直接影响尺寸测量最终的结果,所以本文主要分为边缘检测和尺寸测量,物体边缘往往指的是图像灰度值突然变化的区域,是图像最基本的信息,所以如何精确的提取到图像边缘极其重要^[2]。黄梦涛等^[3]针对微小缺陷难以检测问题,提出了双边滤波代替高斯滤波,采用最大熵和 Otsu 算法自动获取图像的高、低阈值;赵仁燕等^[4]利用 Otsu 最大类间方差法获取最优阈值,把此阈值作为 Canny 边缘检测中的低阈值,并且把最优阈值的 1.6 倍作为高阈值,实验结果表明,可以有效的提取到边缘,但是没考虑到光照对边缘检测结果的影响。刘元峰等^[5]用非极大值且大于指定阈值的方式替代传统 Canny 边缘检测中的非极大值抑制,但算法存在敏感度低和噪声误检且阈值无法自适应设置问题。在边缘检测的基础上,许多学者也对不同工件的尺寸测量做了大量的研究。刘习文等^[6]提出一种贴片晶振尺寸快速视觉检测方法,该方法中的外接矩形检测对于不规则物体轮廓的检测正确率不高。崔可涛等^[7]先利用 Blob 连通域检测铅酸电池槽数然后用外接矩形检测方法求得尺寸,该方法可以快速检测到电池槽以及它的尺寸,但是 Blob 连通域检测效果并不稳定。赵美丹等^[8]利用最小二乘法拟合元件边缘计算尺寸,具有较高的准确性和鲁棒性。

针对上述存在的问题,本文提出在改进的自适应 Canny 边缘检测算法的基础上,再加入均值漂移算法,加强了边缘检测的同时对光照有着较强的抗干扰能力,为后续的尺寸测量提供了基础;再通过 PCA 算法和轮廓点的在 PCA 主方向上的投影得到捏花的尺寸。

1 改进 Canny 算法

图像预处理在算法中极其重要,它关系着接下来的尺寸测量的精度问题,分为两部分:1)对彩色图像的处理,利用均值漂移法实现对彩色对图像的分割;2)以灰度图像作为改进的 Canny 算法的输入图,进行后续处理。流程如图 1 所示。

1.1 均值漂移法

均值漂移法又叫 mean-shift,是一个不断寻找最佳中心点的算法,用以分割图像:先随机选取一个中心点,以默认半径画圆,计算圆内其他所有点与中心点之间的向量值,再把所有向量加在一起的和作为寻找下一个圆心的指标,向量和的方向是中心点移动的方向,向量模的模长是中心点移动的距离,这样就得到了第 2 个中心点^[9-10]。任意点 x 处的偏移向量公式如式(1)所示;继续迭代,直到圆圈内当前点的数量 k_n 与上次迭代圆圈的

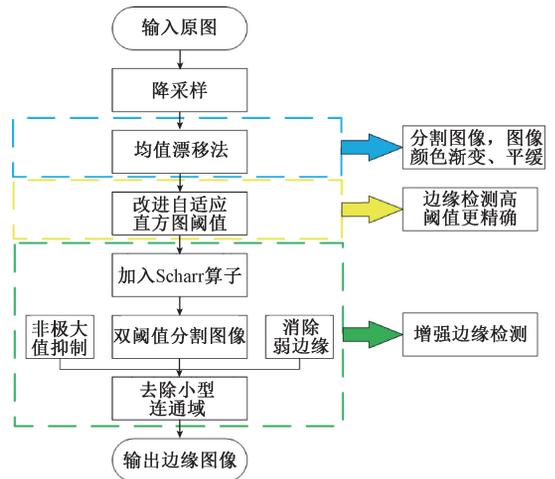


图 1 图像预处理

Fig. 1 Image preprocessing

数量 k_{n-1} 小于设定的阈值 T 时停止,如式(2)所示:

$$M_h(x) = \frac{1}{k} \sum_{x_i \in S_h} (x_i - x) \quad (1)$$

$$K_n - K_{n-1} < T \quad (2)$$

其中, x_i 为样本点,样本点数为 n 个, S_h 是以 x 为中心、半径为 h 的圆,且有 k 个样本点在该圆内。但是实际中,随着样本点 x_i 与中心点 x 的距离越远,该点对偏移向量的贡献越少,所以引入高斯核函数 g 使得与中心点不同距离的样本点,对偏移向量贡献不同。改变后的均值漂移如式(3)所示:

$$M_h(x) = \frac{\sum_{i=1}^n x_i g\left(\left\|\frac{x-x_i}{h}\right\|^2\right)}{\sum_{i=1}^n g\left(\left\|\frac{x-x_i}{h}\right\|^2\right)} - x \quad (3)$$

均值漂移法原理如图 2 所示。

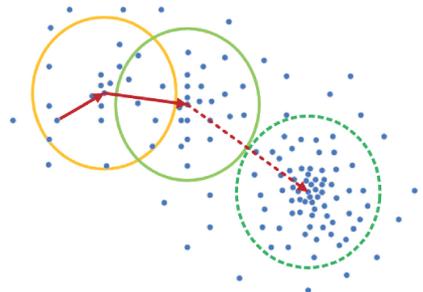


图 2 均值漂移法原理

Fig. 2 Schematic diagram of mean shift method

经过均值漂移处理后,图像颜色变得渐变且平缓,所以一定程度上,具有平滑的作用,在后续的边缘检测步骤中无需再加入滤波,均值漂移局部放大图如图 3 所示。

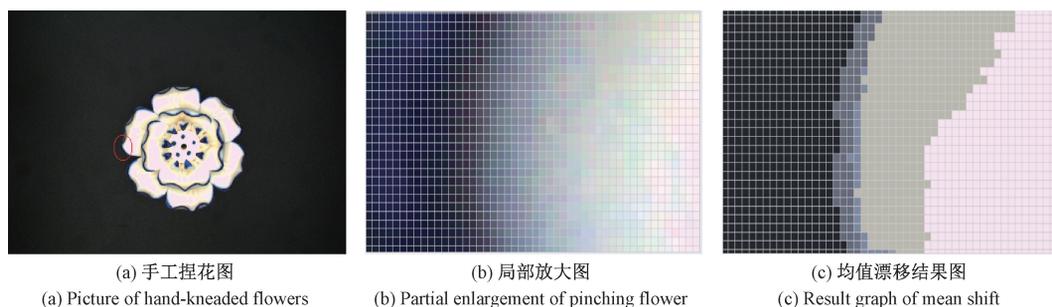


图 3 均值漂移局部放大图

Fig. 3 Local enlargement of mean shift

1.2 增强边缘检测

传统 Canny 边缘检测用的是 sobel 算子, sobel 算子在弱边缘检测上, 稍显不足, 所以要引入 scharr 算子来提升像素值之间的差距, 增强边缘检测^[11]。

1) scharr 算子代替 sobel 算子, 调整 sobel 算子权重系数得到 scharr 算子, 如式(4)、(5)所示:

$$S_y = \begin{bmatrix} -3 & 0 & 3 \\ -10 & 0 & 10 \\ -3 & 0 & 3 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$S_x = \begin{bmatrix} -3 & -10 & -3 \\ 0 & 0 & 0 \\ 3 & 10 & 3 \end{bmatrix} \quad (5)$$

然后代入式(6)、(7)中, 分别求出图像中每个像素的梯度方向 θ 和幅值 G 。

$$\theta = \arctan\left(\frac{S_y}{S_x}\right) \quad (6)$$

$$G = \arctan\sqrt{S_x^2 + S_y^2} \quad (7)$$

2) 在水平、垂直、 45° 、 135° 四个梯度方向应用非极大值抑制算法^[12]。每个像素点的梯度方向按照以上4个方向的欧氏距离相近程度, 把它们归为上述4个方向。 D 为欧氏距离, $p(x, y)$ 、 $q(s, t)$ 为像素点欧氏距离如式(8)所示:

$$D(p, q) = \sqrt{(x-s)^2 + (y-t)^2} \quad (8)$$

1.3 改进直方图获取阈值的方法

Canny 算法是目前边缘检测算法中最优越的算法之一。其优点有很多, 比如在多噪声的情况下仍然能够清晰的检测出弱边缘, 缺点是需要手动输入高、低两个阈值。

若自动获取阈值: 比如, 可采用直方图自动获取阈值的方法^[13]: 先计算出灰度直方图的中位数 $midval$, 然后代入 k 值(k 值是由实验观察得到, 一般取值 0.6) 求出式(9)、(10)中的高阈值 $maxval$ 和低阈值 $minval$ 。但此方法中 $midval$ 并不能作为准确分割目标和背景的依据, 所以无法很好的识别边缘。

改进方法是: 扫描像素点 P_i 并标记第 1 次出现 $P_{i+1} - P_i > 20$ 的点和第 1 次出现 $P_i - P_{i+1} > 20$ 的点, 其中 20 是观测像素值, 然后计算出所有标记点的像素值的平均值 $Mean_mia$ 。若 $Mean_mia > maxval$, 则把 $Mean_mia$ 的值赋值给 $maxval$ 。

$$maxval = (1 + k) \times midval \quad (9)$$

$$minval = (1 - k) \times midval \quad (10)$$

然后利用双阈值划分强弱边缘。大于高阈值标记为强边缘, 介于高低阈值中间的为弱边缘, 而小于低阈值的则不是边缘。

同时消除孤立的弱边缘: 如果该像素的 8 邻域内存在大于高阈值的像素点, 则保留, 否则去除^[14]。

改进的自适应 Canny 检测手工捏花效果对比图如图 4 所示, 其中图 4(c) 添加了强光和桌面划痕。由图 4 可知, 本文边缘检测方法可较好的识别出手工捏花的轮廓, 并且有效的去除桌面划痕和光照。

2 尺寸测量算法

2.1 PCA 算法

尺寸测量算法: 先用 PCA 获取手工捏花主方向, 在主方向的基础上求捏花轮廓的尺寸。PCA 即主成分分析法, 是用来数据降维, 提取图像主要信息, 获取捏花轮廓的主方向^[15-16]。

具体方法是: 先把数据去中心化, 用每一个数据减去它们的平均值, 即把坐标原点放在了数据中心处, 虽然坐标系的位置改变了, 但不影响数据之间的位置关系; 接着寻找新的坐标轴, 使得数据在这个坐标轴上的投影点到原点的方差最大, 方差越大说明投影点在这个坐标轴上的分布越广, 数据保留的信息也就越多。

方差表达式如式(11)所示:

$$S^2 = \sum_{i=1}^n \frac{d^2}{n-1} = \vec{v} \cdot \frac{\vec{A}^T \vec{A}}{n-1} \cdot \vec{v}^T \quad (11)$$

其中, A 是去中心化之后的数据, d 为数据 A 的投影

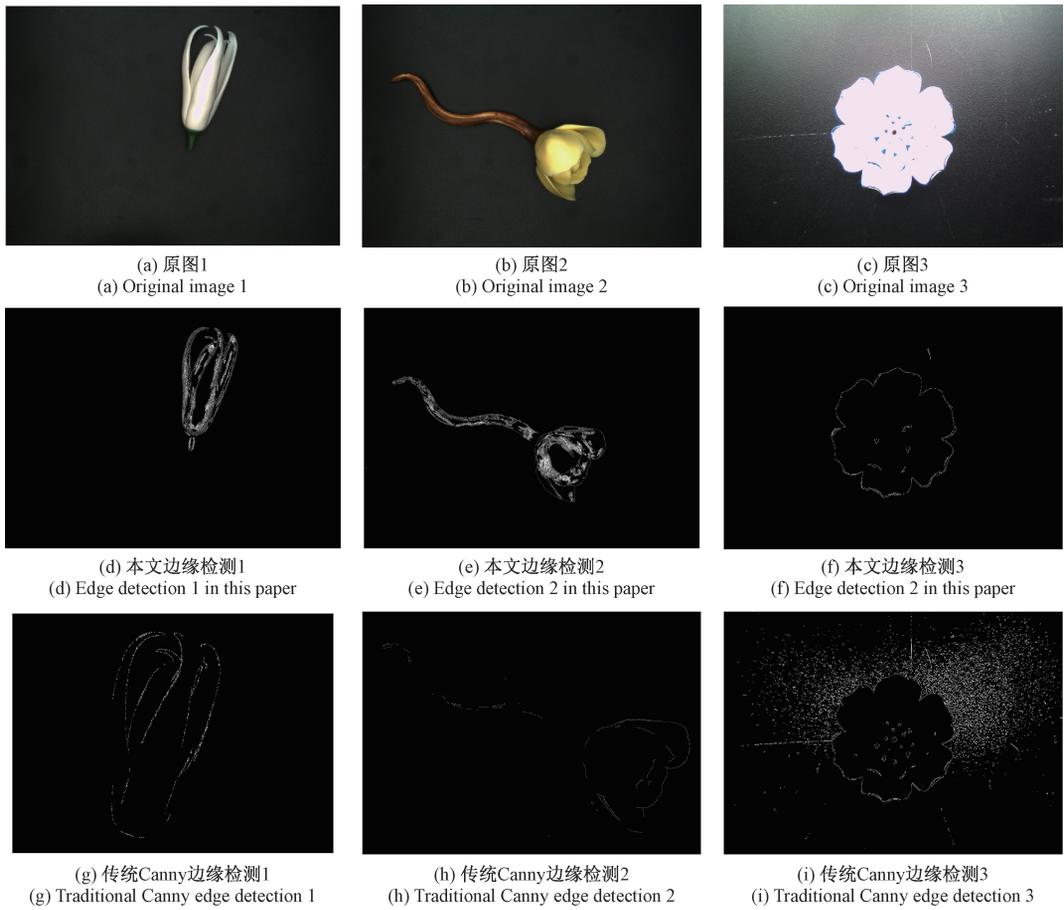


图 4 边缘检测对比图

Fig. 4 Comparison diagram of edge detection

点到原点的距离, \mathbf{v} 是新坐标轴单位向量, n 为样本数量; 为了求的最大方差, 引入协方差矩阵 \mathbf{C} , 如式 (12) 所示, 结合式 (11)、(12) 式得到方差, 如式 (13) 所示:

$$\mathbf{C} = \begin{pmatrix} \text{cov}(x, x) & \text{cov}(x, y) \\ \text{cov}(x, y) & \text{cov}(y, y) \end{pmatrix} = \frac{\mathbf{A}\mathbf{A}^T}{n-1} \quad (12)$$

$$S^2 = \vec{\mathbf{v}} \cdot \mathbf{C} \cdot \vec{\mathbf{v}}^T \quad (13)$$

构造拉格朗日函数并求导, 如式 (14)、(15) 所示:

$$F(\vec{\mathbf{v}}) = \vec{\mathbf{v}} \cdot \mathbf{C} \cdot \vec{\mathbf{v}}^T - \lambda(1 - \vec{\mathbf{v}} \cdot \vec{\mathbf{v}}^T) \quad (14)$$

$$\mathbf{C}\mathbf{v}^T = \lambda\mathbf{v}^T \quad (15)$$

由式 (13)、(15) 可知, 数据 A 在坐标轴上的投影点的方差就是相应的特征值, 所以最大的方差对应最大的特征值, 那么新坐标轴的方向就是此特征值对应的特征向量^[17]。对手工捏花轮廓进行 PCA 运算, 获取主方向, 如图 5 所示, 长直线方向为捏花主方向。

2.2 获取捏花尺寸: 长、宽

主线方程 L (图 5 中长直线) 如式 (16)、(17) 所示, a, c 分别为直线 L 的斜率和截距, 点 pos1 为手工捏花质心点, a 是通过最大的特征值 $\text{eigen_val}[0]$ 和对应的特征

向量 $\text{eigen_vecs}[0]$ 求得:

$$\text{Point2f pos1} = \text{Point2f}(\text{eigen_vecs}[0].x * \text{eigen_val}[0], \text{eigen_vecs}[0].y * \text{eigen_val}[0]).$$

$$\text{double } a = (\text{pos1}.y) / (\text{pos1}.x). \quad (16)$$

$$L: y = ax + c \quad (17)$$

得到主线 L 的表达式之后, 只需要遍历轮廓点并投影在 L 上, 投影点如式 (18)、(19) 所示, 其中 b 的值为 -1 , 形成的“足迹”长度即为手工捏花在主方向上的长度, 如图 5 中长线段。

$$x_1 = \frac{b(-bx_0 + ay_0) + ac}{-a^2 - b^2} \quad (18)$$

$$y_1 = \frac{bc - a(-bx_0 + ay_0)}{-a^2 - b^2} \quad (19)$$

直线 L 把轮廓一分为二, 分别求出这两个轮廓中的点到直线的垂直距离并压入 vector 中, 调用 sort 函数从中筛选两个最大值 d_1 和 d_2 即可, 轮廓的宽度即为 d_1, d_2 之和。如图 5 所示, 两条短线段长度之和为捏花的宽度。

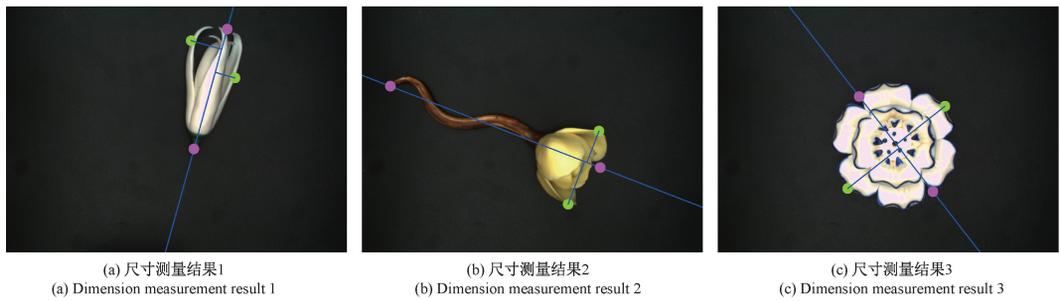


图 5 主方向与尺寸测量

Fig. 5 Main direction and dimension measurement

3 实验结果分析与比较

3.1 实验环境

本文实验是在 VS2019 环境下用 OpenCV3.4.1 实现。外部设备:相机和正方形灯源,相机是用海康威视工业相机,型号是 MV-CE100-30GC,灯源可以调节光照强度。

3.2 实验数据和结果分析比对

算法得到的样本尺寸是以像素为单位,所以要把像素值转化成现实中的实际长度值,这个过程通常被称作测量系统的标定^[18];如取一个长边长度为 d_0 mm 的长方形工件,通过本文算法得到此工件的多组以像素为单位

的长度值,计算出它们平均值 p_0 。设 k 为标定系数,如式(20)所示,并通过式(21),样本像素长度 p_n 转化成实际长度值 d_n , n 为样本数量:

$$k = \frac{d_0}{p_0} \tag{20}$$

$$d_n = k \times p_n \tag{21}$$

本文选择长边长度为 39.00 mm,短边为 19.22 mm 的长方形工件进行了多组测量,标定系数分别为 0.082、0.080,标定系数取 0.081,标定数据如表 1 所示。手工捏花样本是个不规则物体,从多个角度测量会有不同的结果,所以取工业 0.02 mm 的游标卡尺测量的数据的平均值近似为样本的真实值,如表 2 所示。同时与本文算法得到的测量值作对比,如表 3 所示。

表 1 标定数据

Table 1 Calibration data

	测试								平均值	标定系数
长边/pixel	474.34	478.20	476.52	474.94	473.48	474.41	478.69	479.22	476.23	0.082
短边/pixel	241.69	248.77	229.95	244.03	232.43	229.84	249.08	253.68	241.18	0.080

表 2 样本的真实长度

Table 2 True length of sample

样本	游标卡尺测量数据:(长边/短边)/mm								平均值/mm
1	104.72/34.26	104.30/33.04	104.74/33.40	100.42/35.00	101.18/33.76	102.06/34.00	104.82/35.20	103.18/34.09	
2	54.74	56.36	55.52	56.10	57.14	55.70	57.54	56.16	
3	58.24/23.34	59.14/23.90	59.58/23.40	58.70/25.56	59.04/25.30	59.44/23.66	59.52/24.42	59.09/24.23	
4	81.10/29.72	81.00/29.52	80.60/30.20	80.94/30.16	81.08/30.30	80.40/30.10	80.30/30.32	80.77/30.05	
5	50.22/23.24	49.54/23.40	50.30/23.4	50.14/23.54	49.36/23.24	49.64/23.50	50.30/23.26	49.93/23.37	

表 3 本文算法测量结果

Table 3 The measurement results of the algorithm are presented in this paper

测试样本	真实长度/mm		算法测量长度:(长边/短边)/pixel				算法测量长度/mm	误差/mm
1	103.18/34.09	1269.20/452.64	1266.75/448.82	1268.83/449.12	1272.61/451.22	102.82/36.49	0.36/2.4	
2	56.16	717.89	704.14	720.95	698.89	57.55	1.39	
3	59.09/24.23	736.29/324.28	714.34/328.00	738.85/330.25	733.58/322.85	59.19/26.43	0.1/2.2	
4	80.77/30.05	999.91/373.63	990.00/383.89	997.46/381.09	998.07/392.68	80.71/31.00	0.06/0.95	
5	49.93/23.37	647.33/309.32	649.85/312.03	642.85/322.30	646.61/316.23	52.38/25.51	2.45/2.14	

由表 3 数据分析,本文算法误差在 2 mm 左右,满足工业上手工捏花尺寸测量的要求。同样的条件下,样本 4 中误差不到 1 mm,原因在于捏花样本出现在同一镜头下的不同位置像素尺寸会出现一些差别;由表 2、3 可知,标定系数在水平和垂直方向上也是不同的;由于 2D 的测量是基于边缘的提取,边缘反映在灰度值的变化上,所以,光照也是直接影响到测量的精度;此外,手工捏花是一个不规则物体,不同角度,尺寸会有细微差别。

文献[6-7]对矩形的检测结果较好,但对不规则物体识别率不高,而本文方法在不规则物体上的尺寸测量有着较好的检测结果。每组分别循环进行了 30 次实验,并把实验结果误差在 2 mm 左右作为正确识别,实验测试结果如表 4 所示。

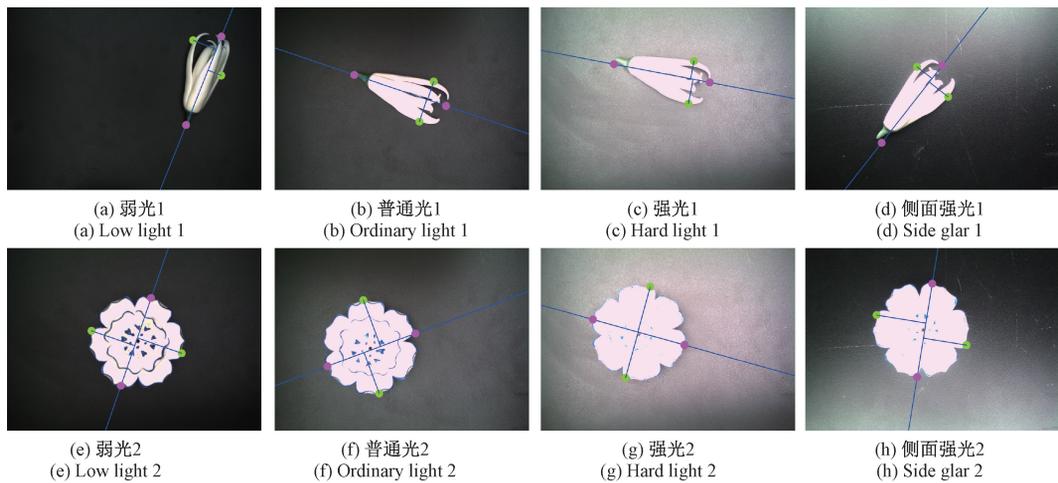


图 6 不同光照下的测量结果

Fig. 6 Measurement results under different illumination

由实验结果可知,在不同的光照条件下,本文方法依然有着较好的检测结果:在边缘检测前加入了均值漂移方法,平滑了图像;边缘检测中加入了面积筛选方法,去除了小型连通域。

4 结 论

为了解决工人不易用游标卡尺去测量手工捏花的尺寸问题,本文提出了在改进的自适应 canny 边缘检测的基础上即加入了 mean-shift 算法分割图像、改进直方图获取自适应阈值、schar 算子增强边缘检测,用 PCA 算法计算出捏花的主方向,然后结合轮廓点的投影计算出像素尺寸,再用标定系数把像素尺寸转换为现实长度尺寸,并通过多组样本在同一镜头下不同位置的尺寸测量结果进行分析,证明了本文算法的准确性;增加了 4 组光照条件对比试验,证明了本文算法在复杂光照条件下的抗干扰能力。

表 4 实验测试结果

Table 4 Experimental test results

测试	文献[6]方法	文献[7]方法	本文方法
正确识别次数	19	24	29
捏花识别率/%	63	80	97

3.3 光照对测量结果的影响

为验证不同光照对实验的影响,设置了 4 组光照条件,分别为弱光、普通光、强光、侧面强光^[19],前 3 种光是正方形光源垂直于相机且在被测物体的正上方,而侧面强光是正方形光源平行于相机且在被测物体的一侧。不同光照下的测量结果如图 6 所示。

由于本文研究对象是手工捏花,它对测量精度的要求不高,但如何提高测量精度并把它应用到微小工件的尺寸测量当中去,有待进一步研究。

参考文献

- [1] 贾国邦,宋丽丽,曹博文,等. 基于机器视觉的微小孔零件尺寸检测研究[J]. 工具技术, 2021, 55(7): 105-109.
JIA G B, SONG L L, CAO B W, et al. Research on dimension detection of micro hole parts based on machine vision [J]. Tool Technology, 2021, 55(7): 105-109.
- [2] 位营杰,师红宇. 基于 Canny 算子的优化研究[J]. 国外电子测量技术, 2021, 40(8): 77-81.
WEI Y J, SHI H Y. Optimization research based on Canny operator [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2021, 40(8): 77-81.
- [3] 黄梦涛,连一鑫. 基于改进 Canny 算子的锂电池极片表面缺陷检测[J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(10):

- 199-209.
HUANG M T, LIAN Y X. Surface defect detection of lithium battery electrode based on improved Canny operator [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 42(10): 199-209.
- [4] 赵仁燕, 李祥鹏, 涂建坤, 等. 基于小波及改进 Canny 算子的光纤涂层层几何参数测量[J]. 电子测量技术, 2021, 44(13): 35-40.
ZHAO R Y, LI X P, TU J K, et al. Measurement of geometric parameters of optical fiber coating based on wavelet and improved Canny operator [J]. Electronic Measurement Technology, 2021, 44(13): 35-40.
- [5] 刘元峰, 刘立波, 刘云. 基于 CT 图像的颅内血肿检测与分割[J]. 中国医学物理学杂志, 2021, 38(9): 1090-1096.
LIU Y F, LIU L B, LIU Y. Detection and segmentation of intracranial hematoma based on CT image [J]. Chinese Journal of Medical Physics, 2021, 38(9): 1090-1096.
- [6] 刘习文, 刘超英. 贴片晶振尺寸快速视觉检测方法[J]. 电子技术与软件工程, 2019(18): 81, 257.
LIU X W, LIU CH Y. Fast visual inspection method for the size of chip crystal oscillator [J]. Electronic Technology and Software Engineering, 2019(18): 81, 257.
- [7] 崔可涛, 刘怀广, 周诗洋, 等. 一种基于机器视觉的铅酸蓄电池尺寸检测方法[J]. 机床与液压, 2021, 49(11): 97-102, 131.
CUI K T, LIU H G, ZHOU SH Y, et al. A size detection method of lead-acid battery based on machine vision [J]. Machine Tool and Hydraulic, 2021, 49(11): 97-102, 131.
- [8] 赵美丹, 余桂英, 瞿永顺, 等. 微小型光学元件尺寸的视觉测量系统研制[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(8): 372-380.
ZHAO M D, YU G Y, QU Y SH, et al. Development of visual measurement system for the size of micro optical elements [J]. Progress in Laser and Optoelectronics, 2021, 58(8): 372-380.
- [9] 严飞, 夏金锋, 马可, 等. 基于 Mean Shift 算法的目标跟踪系统设计[J]. 电子测量技术, 2020, 43(23): 6-11.
YAN F, XIA J F, MA K, et al. Design of target tracking system based on mean shift algorithm [J]. Electronic Measurement Technology, 2020, 43(23): 6-11.
- [10] LIU C, BIAN T, ZHOU A. Multiobjective multiple features fusion: A case study in image segmentation[J]. Swarm and Evolutionary Computation, 2021, 60: 100792.
[11] 胡敏, 高永, 吴昊, 等. 融合边缘检测和递归神经网络的视频表情识别[J]. 电子测量与仪器学报, 2020, 34(7): 103-111.
HU M, GAO Y, WU H, et al. Video expression recognition based on edge detection and recurrent neural network [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2020, 34(7): 103-111.
- [12] QIN X. A modified Canny edge detector based on weighted least squares [J]. Computational Statistics, 2021, 36(1): 641-659.
- [13] MENG Y, ZHANG Z, YIN H, et al. Automatic detection of particle size distribution by image analysis based on local adaptive canny edge detection and modified circular Hough transform [J]. Micron, 2018, 106: 34-41.
- [14] 阙禄松, 王明泉, 张俊生, 等. 基于 Canny 算子和形态学滤波的焊缝图像背景去除技术[J]. 国外电子测量技术, 2020, 39(1): 10-14.
QUE L S, WANG M Q, ZHANG J SH, et al. Background removal technology of weld image based on Canny operator and morphological filtering [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2020, 39(1): 10-14.
- [15] 张贺娜, 乐燕芬, 施伟斌. 基于特征降维的核岭回归室内定位算法[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(10): 83-91.
ZHANG H N, LE Y F, SHI W B. Kernel ridge regression indoor location algorithm based on feature dimension reduction [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(10): 83-91.
- [16] LV W, TANG W, HUANG H, et al. Research and application of intersection clustering algorithm based on PCA Feature extraction and K-means [J]. Journal of Physics: Conference Series, 2021, 1861(1): 012001.
- [17] 宣伟, 花向红, 邹进贵, 等. 自适应最优邻域尺寸选择的点云法向量估计方法[J]. 测绘科学, 2019, 44(10): 101-108, 116.
XUAN W, HUA X H, ZOU J G, et al. Point cloud normal vector estimation method for adaptive optimal neighborhood size selection [J]. Surveying and Mapping Science, 2019, 44(10): 101-108, 116.
- [18] 洪瑞. 基于机器视觉的圆形工件二维尺寸测量方法研究[D]. 安徽: 安徽工业大学, 2017.
HONG R. Research on two-dimensional dimension measurement method of circular workpiece based on machine vision [D]. Anhui: Anhui University of Technology, 2017.
- [19] 焦传佳, 江明. 基于 AprilTag 图像识别的移动机器人

定位研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2021, 35(1): 110-119.

JIAO CH J, JIANG M. Research on mobile robot positioning based on AprilTag image recognition [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2021, 35(1): 110-119.

作者简介



赵朝朝, 2019 年于巢湖学院获得学士学位, 现安徽工程大学硕士研究生, 主要研究方向为计算机视觉。

E-mail: 707158058@qq.com

Zhao Zhaozhao received his B. Sc. degree from Chaohu University in 2019. Now

he is a M. Sc. candidate at Anhui Polytechnic University. His main research interest includes computer vision.



江明(通信作者), 1993 年于上海工业大学(现上海大学)获得硕士学位, 现为安徽工程大学教授、硕士生导师, 主要研究方向为机器人智能控制系统和先进检测技术。

E-mail: kjjm@ahpu.edu.cn

Jiang Ming (Corresponding author) received his M. Sc. degree from Shanghai Technology University (now Shanghai University) in 1993. He is now a professor and M. Sc. supervisor at Anhui Polytechnic University. His main research interests include robotic intelligent control system and advanced detection technology.