

基于机器视觉的卷烟端面圆度评价方法研究



程东旭¹, 王瑞兵², 王瑞珍¹, 周君洋², 牛振雨², 李聪聪², 赵正阳², 张凯², 张鹏飞^{3,*}

¹河南中烟工业有限责任公司, 河南郑州 450000

²中国计量大学计量测试与仪器学院, 浙江杭州 310018

³中国烟草总公司郑州烟草研究院, 河南郑州 450001

摘要: 卷烟圆度是烟草工业中重要的质量参数, 为解决传统行业圆度测量方法费时费力且结果不准确的问题, 提出了一种基于最小二乘法的非接触式卷烟圆度评价方法对卷烟端面圆度进行评价, 所述方法首先通过 Canny 算子初步识别边缘, 然后使用形态学闭运算将边缘毛刺消除后再通过连通性分析将边缘内部填充, 最后利用 Sobel 算子识别最终边缘。对处理后的图像使用最小二乘法拟合出卷烟端面轮廓的拟合圆, 通过对得到的拟合圆进行计算得到卷烟端面圆度的计算结果, 由于计算结果为像素距, 需要转换为实际尺寸, 采用像素当量标定法确定转换系数, 最终得到卷烟端面的圆度。实验结果表明, 机器视觉测量得到的结果相对误差小于 2%, 说明该方法可以有效的对卷烟端面圆度进行评价。

关键词: 机器视觉; 卷烟圆度检测; 最小二乘法; 非接触式; 图像处理算法

DOI: 10.57237/j.se.2024.03.001

Research on the Evaluation Method of Cigarette End Roundness Based on Machine Vision

Cheng Dongxu¹, Wang Ruibing², Wang Ruizhen¹, Zhou Junyang², Niu Zhenyu², Li Congcong², Zhao Zhengyang², Zhang Kai², Zhang Pengfei^{3,*}

¹China Tobacco Henan Industrial Co., Ltd., Zhengzhou 45000, China

²College of Metrology Measurement and Instrument, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China

³Zhengzhou Tobacco Research Institute of CNTC, Zhengzhou 450001, China

Abstract: Cigarette roundness is an important quality parameter in the tobacco industry. In order to solve the problem that traditional industry roundness measurement methods are time-consuming, laborious and inaccurate, a non-contact cigarette roundness evaluation method based on the least squares method is proposed to evaluate the cigarette end roundness. To evaluate the accuracy, the method first initially identifies the edge through the Canny operator, then uses the morphological closing operation to eliminate the edge burrs, then fills the inside of the edge through connectivity analysis, and finally uses the Sobel operator to identify the final edge. Use the least squares method on the processed image to fit the fitting circle of the cigarette end face contour. By calculating the obtained fitting circle, the calculation

基金项目: 国家市场监督管理总局科技计划项目 (2023MK229).

*通信作者: 张鹏飞, yczhangpf@163.com

收稿日期: 2024-04-02; 接受日期: 2024-04-30; 在线出版日期: 2024-05-23

<http://www.sciandeng.com>

result of the cigarette end face roundness is obtained. Since the calculation result is a pixel distance, it needs to be converted into the actual size, using the pixel equivalent calibration method to determine the conversion coefficient, and finally obtain the roundness of the cigarette end face. The experimental results show that the relative error of the results obtained by machine vision measurement is less than 2%, indicating that this method can effectively evaluate the roundness of the end face of cigarettes.

Keywords: Machine Vision; Cigarette Roundness Detection; Least Squares Method; Non Contact Type; Image Processing

1 引言

随着全球控烟运动的变革,烟草产业正面临需求和技术革新的新局面,进而推动了新型烟草制品的研发,例如加热不燃烧卷烟、电子烟等。在这些新型烟草制品中,卷烟的物理指标,如圆周分布、圆度,对其性能起着重要作用[1]。卷烟的圆度是国际标准要求中的一个物理指标之一,它综合评价了卷烟和滤棒的加工质量,对其物理指标进行严格的检测把关。

目前,卷烟圆度的测量方法主要包括人工测量和机器测量两种。传统的圆度误差测量方法主要依赖人工进行。检测人员使用游标卡尺等手动测量工具对工件进行测量,然而这种方法存在较大的测量误差。此外,人工测量需要在机器停机状态下进行,增加了停机次数,大大降低了机器的利用率和加工效率。因此,人工测量方法的测量效率和测量精度相对较低。

吴忠勇等人提出了一种基于自适应综合学习(ACL-PSO)的粒子群优化算法,利用实编码策略评估圆度误差[2]。Azmi Mohamed等人提出了基于视觉的圆柱形零件圆度误差测量系统。评估基于最小区域(MZC)圆法,在系统设置和图像捕获技术方面采用了新的方法,符合了该形状公差的测量要求[3]。魏欣等提出了一种高精度圆度测量系统[4],张士舰等人通过投影圆度判别法进行圆柱拟合[5],董紫燕等人对差分进化算法进行改进,再用改进后的差分进化算法求解圆度误差数学模型,提高了计算精度[6]。Chi-Tsan Wang等人针对轴承滚子尺寸测量效率低、误差大、圆度评价不准确的问题,提出一种基于改进Canny算子的三阶灰矩子像素检测算法,用于定位滚子边缘子像素。然后利用改进的最小区域圆(MZC)对误差进行评估,实现轴承滚子圆度和圆柱度的接触和非接触在线测量[7]。

现存卷烟的圆周分布、圆度误差的测量方式分为投影法、光电法,其主要是利用平行光源对被测样本进行投影,进而形成光信号,由处理系统给出卷烟样本的参数指标,然而投影法和光电法只能测量工件的

一个横截面,不能反映工件的整体圆度,并且需对工件进行旋转或移动,会引入误差,同时其测量精度受限于投影仪或光电传感器的分辨率。

基于以上测量现状及存在的问题,本文提出一种非接触式的基于最小二乘法拟合圆的卷烟端面圆度的测量方法,通过最小化数据点到圆的距离平方和来拟合圆的。这种方法能够在数据存在一定的噪声和离群值时提供较好的拟合效果。它对于圆形的变形和缺陷有一定的鲁棒性。运用高分辨率相机和镜头,配合工业光源进行成像,结合计算机技术、数字图像处理技术等可同时完成卷烟圆周分布、圆度等几何量的综合测量,测量过程对卷烟不产生任何损害,为卷烟正确生产验收提供可靠保障[8]。

2 系统构成及工作原理

2.1 卷烟圆度测量系统

卷烟几何量视觉测量装置用于检测卷烟圆度和几何尺寸,测量系统主要包括环形光源、高分辨率工业相机、光学镜头、测量平台、相机支架及图像采集设备和上位机分析软件。卷烟样本端面测量装置主要部分的结构框图如图1所示。

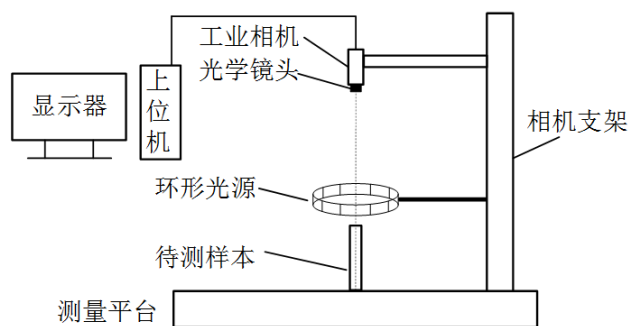


图1 卷烟样本视觉测量装置示意图

该检测系统主要是针对卷烟几何量的检测,可以完成卷烟的圆周分布及圆度等相关的形位误差的检测,该图像采集系统用于对卷烟样本的图像采集,该检测平台操作简单,精度高[9]。测量装置实物图如图2所示。

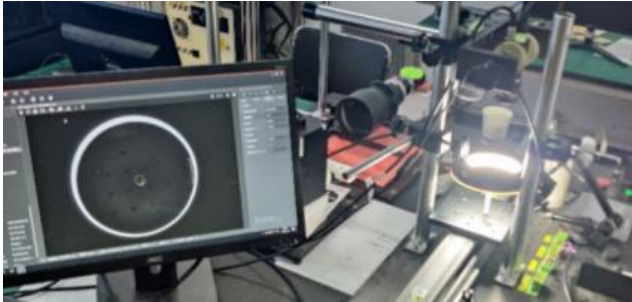


图2 测量装置实物图

工业相机选用 MV-LRDS-120-30-W 传感器相机,分辨率为 2000 万像素,数据接口为 USB3.0;光学镜头选用 MVL-MF1620M-5MP 镜头;利用 LED 环形光源可捕捉卷烟样本端面轮廓图像。

2.2 系统工作原理

通过高分辨面阵 CCD 相机和环形光源,对放置在测量平台上的卷烟进行拍摄,分别对卷烟的滤嘴面和烟丝面进行拍摄,完成卷烟图像的采集;再将采集到的卷烟图像上传至上位机中进行图像预处理。主要是对载入处理程序的原始卷烟图像进行灰度和亮度的调整以及图像滤波降噪,目的是突出卷烟的区域,分割背景部分,

为后续的卷烟边缘轮廓像素的精确定位提供便利。

对采集的卷烟原始图像进行图像预处理,通过频域滤波调节亮度,结合高斯滤波降低噪声;对处理后的图像,采用 Canny 边缘检测算子提取卷烟边缘,然后对边缘轮廓像素进行坐标编码和系统标定,将像素坐标转换为直角坐标,再通过最小二乘法拟合圆来计算卷烟的圆度[10]。系统工作原理流程图如图3所示。

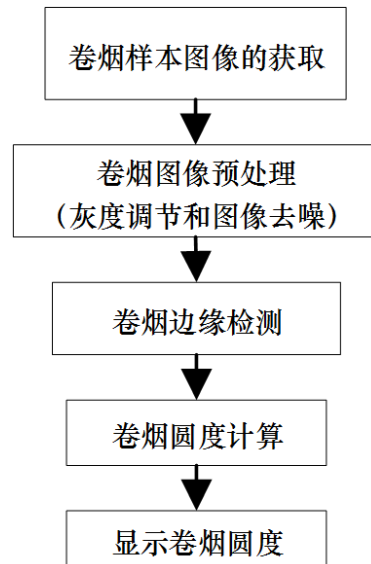
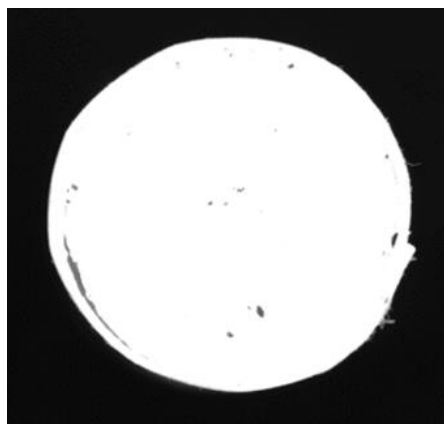
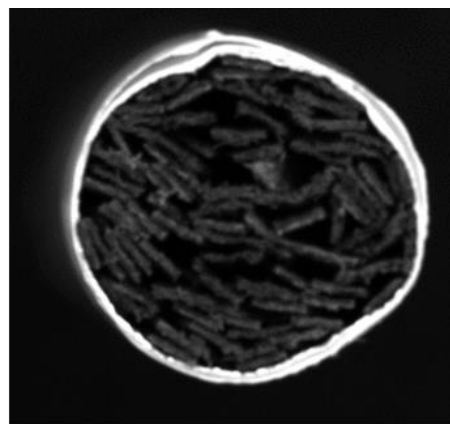


图3 系统工作原理流程图

依据上述流程来对卷烟样本端面进行处理,通过相机对烟支端面进行拍摄,烟支端面示意图如图4所示。



(a) 滤嘴端拟合圆



(b) 烟丝端拟合圆

图4 烟支端面示意图

3 卷烟图像处理与圆度误差评定原理

3.1 视觉传感器标定

在采用圆形特征标定板做标定时，由于标定板的摆放与相机不一定完全平行，导致采集到的圆会成像为椭圆，因此，圆提取的精度会对相机标定的精度造成很大的影响[11]。所以在进行卷烟样本采集前，先通过对 7×7 圆形特征标定板进行标定，来降低相机标定误差，进而提高卷烟样本圆度误差评定精度，圆形特征标定板如图 5 所示。

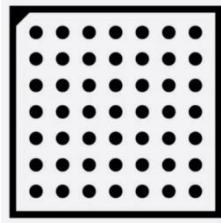


图 1 圆形特征标定板

标定是确定图像坐标系与空间坐标系的转换关系，用以计算实际的尺寸[12]。测量系统为单目视觉，采用像素当量标定法确定转换系数 k ：

$$k = D / P \quad (1)$$

式中： D 为空间距离， P 为对应的像素数。

3.2 算法原理

先通过 Canny 算子初步识别边缘，然后对 Canny 算子提取出来的初步图像进行形态学开运算，其原理是开运算是先执行腐蚀(Erosion)，再进行膨胀(Dilation)操作。然后对图像应用高斯滤波，其原理为高斯滤波器将图像的每个像素与周围像素进行加权平均，以模糊图像并减少噪声，然后在模糊后的图像上，再使用 Sobel 算子计算图像的梯度[13]。

它的作用主要有两个方面，去除小型的噪声和细小的物体：由于腐蚀操作能够消除边界像素，开运算可以用于去除图像中的小型噪声或细小的物体，使图像更清晰。随后使用形态学闭运算将边缘毛刺消除后再通过连通性分析将边缘内部填充，通过连通域分析以及图像填充可以将边缘内部的区域进行填充，其实现原理主要是从种子点开始，使用连通性算法遍历图像，找到与种子

点相连的相邻像素。对于每个相邻像素，检查其像素值是否符合填充条件。填充条件为该像素是否为边缘。如果符合填充条件，将该像素标记为填充区域的一部分，并将其作为新的种子点，继续向相邻像素进行填充重复上述步骤，直到无法再填充新的像素或遍历完整个图像。最终填充区域将逐渐扩展，直到无法再添加新的像素为止。选择一个种子点(seed point)作为填充的起始点。通过以上步骤，可以将指定的种子点为起点，沿着连通路径填充图像中的空洞或区域。填充过程中的连通性算法确保了填充区域与种子点之间的像素具有连续性[14]。然后利用 Sobel 算子识别最终边缘。

3.3 卷烟图像边缘提取

在卷烟图像采集之后，需要对卷烟图像进行处理，以得到其清晰的单像素边缘用于最小二乘法拟合圆[15]。步骤如下图 6 所示。

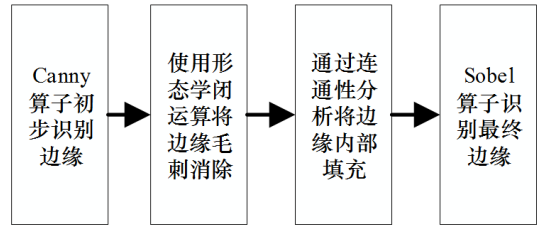


图 6 图像处理流程图

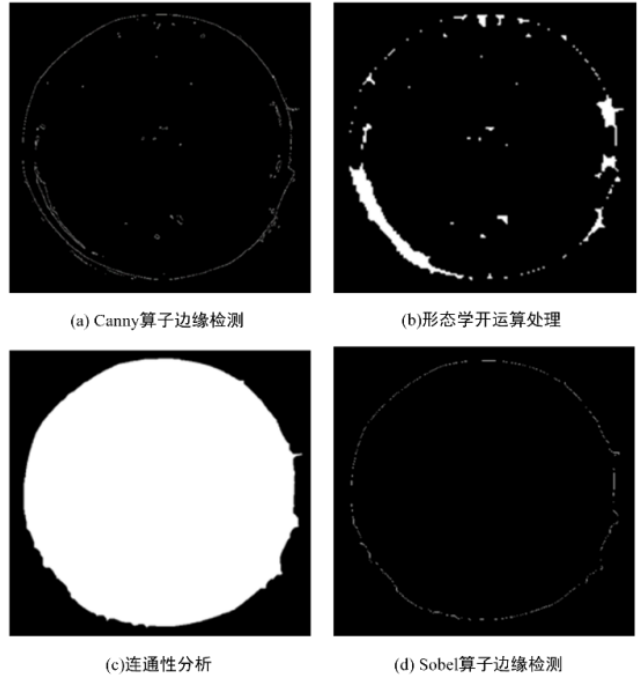


图 7 滤嘴端 Canny 算子边缘检测图

通过 Canny 算子能够有效地检测出图像中的边缘,同时尽量抑制噪声和非边缘像素的干扰。分别对卷烟样本的烟丝端和滤嘴端进行处理和最小二乘圆拟合。

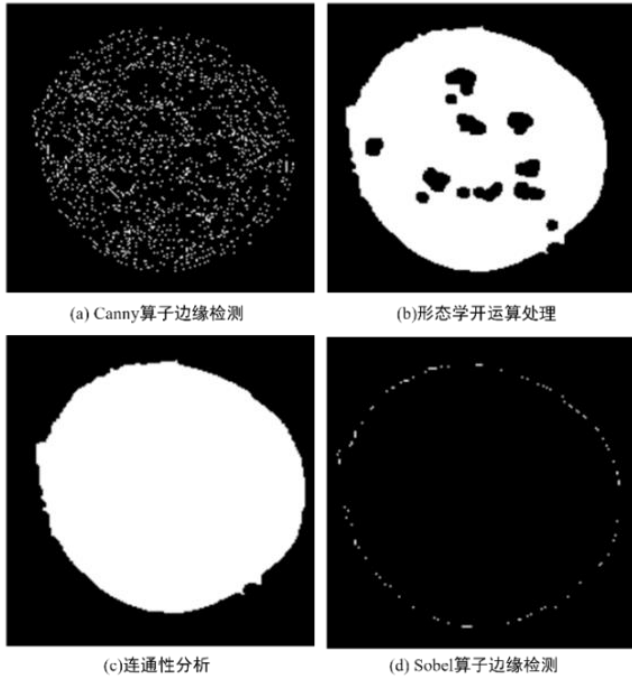


图 8 烟丝端 Canny 算子边缘检测图

由图 7(a)和图 8(a)可看出, Canny 算子提取出来的边缘尚存在毛刺和不连续以及内部存在杂质,因此需要进一步进行处理[16]。如图 7(b)和图 8(b)形态学开运算处理图所示,在进行形态学开运算处理后的边缘的不连续和毛刺现象得到了解决,且更加明显,但是其内部仍然存在小块杂质。再进行连通性分析和内部填充处理,为精细边缘提取做准备,效果如图 7(c)和图 8(c)所示。再对将内部区域填充后的图像进行 Sobel 算子计算进行边缘检测,如图 7(d)和图 8(d) Sobel 算子边缘检测图所示。

3.4 最小二乘法评定圆度误差的原理

卷烟端面经过上位机预处理后可以进行圆度误差的评定[17],通过最小二乘圆法来拟合出卷烟端面轮廓的平均圆为 P_i 点测量半径, $e=OO'$ 为两中心的偏心距, θ_i 为 OP_i 与 X 轴之间的夹角,最小二乘法原理示意图如图 9 所示。

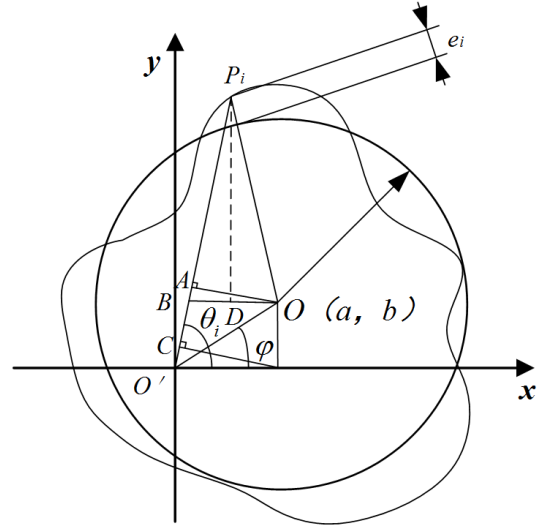


图 9 最小二乘法原理图

由 $\triangle O'O P_i$ 得:

$$r_i = e \cos(\theta_i - \varphi) \sqrt{(R + \varepsilon_i)^2 - e^2 \sin^2(\theta_i - \varphi)} \quad (2)$$

由于 $e \ll R, |\sin(\theta_i - \varphi)| \leq 1$, 所以式(2)可近似为:

$$\varepsilon_i = r_i - R - e \cos(\theta_i - \varphi) \quad (3)$$

式中: ε_i — P_i 点为拟合圆的径向偏差。

由最小二乘法原理可知 $\sum_{i=1}^n \varepsilon_i^2$ 最小, 所以:

$$\frac{\partial \sum_{i=1}^n \varepsilon_i^2}{\partial R} = 0, \frac{\partial \sum_{i=1}^n \varepsilon_i^2}{\partial e} = 0, \frac{\partial \sum_{i=1}^n \varepsilon_i^2}{\partial \varphi} = 0 \quad (4)$$

另外可以得到:

$$\begin{cases} R = \frac{1}{n} \sum r_i \\ a = \frac{2}{n} \sum r_i \cos \theta_i \\ b = \frac{2}{n} \sum r_i \sin \theta_i \end{cases} \quad (5)$$

$$e \cos(\theta_i - \varphi) = a \cos \theta_i + b \sin \theta_i \quad (6)$$

由式(5)和(6)可以进一步推导得:

$$\varepsilon_i = \Delta r_i - \Delta R - a \cos \theta_i - b \sin \theta_i \quad (7)$$

$$\begin{cases} \Delta R = \frac{1}{n} \sum \Delta r_i \\ a = \frac{2}{n} \sum \Delta r_i \cos \theta_i \\ b = \frac{2}{n} \sum \Delta r_i \sin \theta_i \end{cases} \quad (8)$$

计算求得 n 个点对应的 ε_i 值,找出最大值 ε_{max} 和最小值 ε_{min} , 再通过最小二乘法来计算圆度误差为:

$$f = \varepsilon_{max} - \varepsilon_{min} \quad (9)$$

4 实验结果与分析

本研究以卷烟样本为例进行测量说明, 需要测量卷烟样本的端面直径(烟丝面直径 R_1 、滤嘴面直径 R_2) 以及圆度误差 f 等, 卷烟样本如图 10 所示。



图 10 卷烟样本实物图

通过最小二乘法拟合后的图像如图 11 所示, (a)为滤嘴端, (b)为烟丝端虚线圆为拟合后的标准圆。

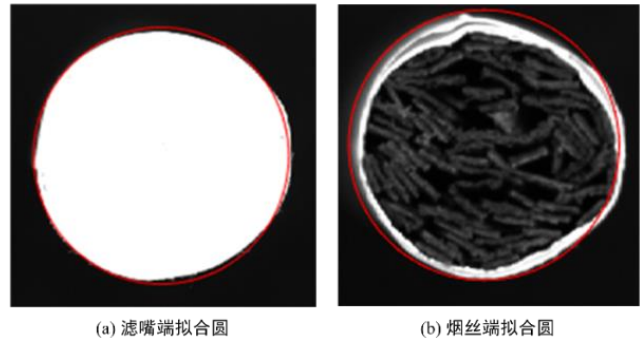


图 11 最小二乘法拟合结果图

得到最小二乘圆后, 可以出计算圆度误差[18]。既

计算卷烟端面轮廓上一个像素点到最小二乘圆圆心的距离, 再减去拟合圆的半径, 对最终的结果取绝对值, 计算出该点的 ε_i 值。然后再将所有像素点处理后的数据进行排列, 得出 ε_{max} 和 ε_{min} , 以此对圆度误差进行计算。通过上述过程可以计算得到滤嘴端在视觉转换前的圆度误差为 $f=2.69632pixel$ 。

在上述计算过程中需要进行单位的转换, 即将像素距转换为实际的公制单位, 来计算实际的尺寸。经过测量得出标定板圆孔直径的分辨率为 $320.208pixel$, 通过实际的空间尺寸和像素距进行转换, 可以得到像素距到实际尺寸的转换系数 k :

$$k = \frac{250}{320.208} \approx 0.8mm / pixel \quad (10)$$

因此, 圆度误差为:

$$f = 2.696 \times 0.8 \approx 2.16mm \quad (11)$$

本研究取卷烟样本 5 根, 分别对样本的滤嘴端、烟丝端进行图像采集, 同时对样本的端面圆度进行测量, 用以比较通过机器视觉进行评价的圆度误差, 卷烟样本圆度误差评定对比如表格 1 所示, 根据实际测量值与视觉测量值计算得到的相对误差都小于 2%, 满足生产要求。

表 1 卷烟样本圆度误差评定对比

编号	端面	实际测量值 (mm)	视觉测量值 (mm)	相对误差 (%)
样本 1	烟丝端	2.061	2.040	1.018
样本 2		1.904	1.935	-1.628
样本 3		1.847	1.864	-0.920
样本 4		1.773	1.756	0.959
样本 5		1.973	1.965	0.406
样本 1	滤嘴端	2.083	2.110	-1.296
样本 2		2.126	2.102	1.129
样本 3		2.081	2.104	-1.105
样本 4		2.029	2.055	-1.281
样本 5		1.947	1.963	-0.822

5 结语

本文提出了一种应用于卷烟端面圆度误差评价方法, 该方法可以实现对卷烟圆度的数据采集, 不仅可以大幅度提高卷烟生产中圆度的测量速度和精度, 还可以减少人工干预和误差, 提高生产效率和产品质量。由于卷烟样本在进行测量时会受到一定挤压, 导致端面发生形变, 对最终结果会产生一定影响, 但该方法同样可以对圆度进行评价, 为圆度误差的评定提供了

新的方法。同时,在研究过程中也发现了一些机器视觉技术在实际应用中存在的一些问题和挑战,比如光照条件对图像的影响、物体形态和尺寸的变化、噪声干扰等,也为之后研究如何降低这些影响因素对圆度误差评定的精度提供了基础。

参考文献

- [1] 胡静宜, 杨永锋, 刘茂林, 等. 打叶复烤后不同尺寸片烟的化学成分差异 [J]. 西北农林科技大学学报 (自然科学版), 2020, 48(09): 89-96.
- [2] Wu, Z., Gou, J., & Cui, C. (2010). An Improved Particle Swarm Optimization Algorithm Applied to the Unified Evaluation of Circularity Error. *Applied Mechanics and Materials*, 44-47, 3937 - 3941.
- [3] A. Mohamed, Abdul Halim Esa and Muhammad Azmi Ayub, "Roundness measurement of cylindrical part by machine vision," *International Conference on Electrical, Control and Computer Engineering 2011 (InECCE)*, Kuantan, Malaysia, 2011, pp. 486-490.
- [4] 魏欣, 王栋, 蔡宇, 等. 一种高精度圆度测量系统的设计 [J]. 无线互联科技, 2021, 18(21): 67-68+118.
- [5] 张士舰, 刘春杰, 李金富, 等. 投影圆度判别法的圆柱拟合 [J]. 测绘科学技术学报, 2014, 31(04): 355-358+362.
- [6] 董紫燕, 徐旭松, 李梦园, 等. 基于改进差分进化算法的圆度误差评定 [J]. 江苏理工学院学报, 2023, 29(02): 19-27.
- [7] Wang, C., & Zhu, Y. (2023). Machine vision based roundness and cylindricity detection of bearing rollers. *Conference on Image, Signal Processing, and Pattern Recognition*.
- [8] 朱朝阳, 赵涛, 刘清, 等. 基于机器视觉的销钉圆度测量技术研究 [J]. 计算机技术与发展, 2020, 30(08): 216-220.
- [9] 赵则祥, 王帅飞, 赵新宇. 基于圆/柱度仪的回转体两点尺寸测量方法研究 [J]. 计量学报, 2023, 44(06): 858-864.
- [10] 刘洋, 杨理践, 郑福印. 基于激光影像的管道几何形变图像处理算法 [J]. 电子世界, 2018, (12): 27-28.
- [11] 汪首坤, 赵金枝, 姜明, 等. 基于圆形阵列标定板的张氏相机标定法 [J]. 北京理工大学学报, 2019, 39(08): 859-863.
- [12] 李小菁. 基于机器视觉的小型零件尺寸测量系统 [J]. 自动化与信息工程, 2023, 44(02): 11-15.
- [13] 王玉玺, 陈健美. 基于自适应 Canny 算子和多方向 Sobel 算子的虹膜边缘检测算法 [J]. 计算机与数字工程, 2020, 48(11): 2744-2749.
- [14] 李锐风, 杨云福, 杨永发, 等. 基于机器视觉的玫瑰花检测与特征提取 [J]. 中国农业科技导报, 20: 1-8.
- [15] 刘浩, 贺福强, 李荣隆, 等. 基于机器视觉的卷烟小盒商标纸表面缺陷在线检测技术 [J]. 中国烟草学报, 2020, 26(05): 54-59.
- [16] 张丽红, 王洪喜, 王冠伟, 等. 基于远镜头的活塞外轮廓机器视觉测量技术研究 [J]. 工具技术, 2023, 57(12): 144-149.
- [17] 林琳, 孟秋博, 李栋浩. 最小二乘法在求解乙醇耦合制备 C_4 烯烃最优条件中的应用 [J]. 数学与统计, 2022, 1(1): 0-14.
- [18] 黄力峰, 汪伟, 吴南星. 基于最小二乘原理的圆拟合及误差评定算法研究 [J]. 机械工程与自动化, 2020, (02): 4-6.

作者简介

程东旭

1989 年生, 硕士研究生, 工程师. 主要研究方向为烟草计量.

E-mail: cchhddxx@163.com

张鹏飞

1987 年生, 硕士研究生, 高级工程师. 主要研究方向为烟草计量.

E-mail: yc Zhangpf@163.com