

# 基于机器视觉的烟梗长度测量方法

董世超<sup>1</sup>, 陈丙三<sup>1</sup>, 连长伟<sup>2</sup>, 卢敏瑞<sup>2</sup>, 彭小冬<sup>1</sup>, 张腾健<sup>2</sup>, 王芳<sup>2</sup>

(1. 福建理工大学 机械与汽车工程学院, 福建 福州 350118;

2. 福建武夷烟叶有限公司, 福建 邵武 354000)

**摘要:** 针对传统人工烟梗长度测量方法存在效率低、劳动强度大、精度难以保证等问题, 提出了一种利用机器视觉测量不同形态烟梗长度的分类测量法。该方法通过2500万像素的高端面阵黑白相机采集烟梗清晰数字图像。首先, 通过中值滤波结合图像开运算、全局阈值分割、图像连通性操作等步骤对图像进行预处理并提取烟梗感兴趣区域。然后, 根据矩形度将其分为矩形和异形两种类型, 以提高测量的准确性。最后, 采用基于凸包获取最小外接矩形测量法和基于骨架提取自适应宽度的改进Steger算法, 分别对两种形态的烟梗进行测量。选取15组长度不同的矩形梗和异形梗, 通过三坐标测量仪测量烟梗的标准值与本方法测量值对比。结果表明: 相较于骨架提取法和传统Steger算法, 采用该方法对矩形与异形梗测量的最大相对误差分别为-0.196%和-0.109%, 对单根烟梗的重复测量最大误差分别为0.008 mm和0.006 mm, 不但具有较高的精度和较好的稳定性, 还可显著降低劳动强度, 具备广泛的实际应用潜力。

**关键词:** 机器视觉; 烟梗测量; 最小外接矩形; 改进Steger算法

中图分类号: TP29

文献标志码: A

文章编号: 2097-3853(2024)01-0074-08

## Measurement method of tobacco stem length based on machine vision

DONG Shichao<sup>1</sup>, CHEN Bingsan<sup>1</sup>, LIAN Changwei<sup>2</sup>, LU Minrui<sup>2</sup>,  
PENG Xiaodong<sup>1</sup>, ZHANG Tengjian<sup>2</sup>, WANG Fang<sup>2</sup>

(1. School of Mechanical and Automotive Engineering, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China;

2. Fujian Wuyi Leaf Tobacco Co., Ltd., Shaowu 354000, China)

**Abstract:** In response to the challenges posed by traditional manual measurements of tobacco stem length, characterized by low efficiency, high labor intensity, and difficulty in ensuring accuracy, a classification measurement method for measuring the length of different forms of tobacco stems by machine vision was proposed. This method collects clear digital images of tobacco stems through a 25 million pixel high-end array black-and-white camera. Initially, the images were subjected to preprocessing through median filtering and image opening operations. Subsequently, global threshold segmentation and image connectivity techniques were applied to extract and crop the region of interest within the tobacco stem. Based on morphology, the tobacco stems were then categorized into rectangular and curved types to enhance measurement accuracy. To perform measurements, two distinct approaches were employed for these two morphological categories: the minimum bounding rectangle measurement method for rectangular stems and an improved Steger algorithm based on the adaptive width skeleton extraction for curved stems. Fifteen groups of rectangular stems and curved ones with different lengths were selected, and the standard values of tobacco stems measured by three-coordinate measuring instrument were compared with the measured values of this method. Experimental results demonstrate that the maximum relative errors of rectangular and irregular stems measured by this method are -0.196% and -0.109%, respectively, and the maximum repeated measurement errors for a single tobacco stem are 0.008 mm and 0.006 mm, respectively. This method not only has high accuracy and good stability, but also significantly reduces labor intensity and has broad practical application potential.

**Keywords:** machine vision; tobacco stem measurement; minimum bounding rectangle; improved Steger algorithm

收稿日期: 2023-11-24

基金项目: 中国烟草总公司福建省公司科技计划项目(2023350000200090)

第一作者简介: 董世超(1994—), 男, 河南商丘人, 硕士研究生, 研究方向: 机器视觉。

通信作者: 卢敏瑞(1982—), 男, 福建龙岩人, 工程师, 研究方向: 打叶复烤工艺研究。

烟梗作为经济农作物烟叶加工中的副产物,通常占据烟叶总质量的 20%~30%,其具有形状不规则、长短不等、宽窄不一致等特点<sup>[1]</sup>。其中,烟梗长度作为衡量烟叶打叶复烤工艺中的关键检测指标,其超出规定范围将直接影响烟梗的出丝率<sup>[2]</sup>。传统烟梗的测量一直依赖于人工测量,不仅劳动强度大、主观性强,测量精度也难以保证。

目前,国内外关于烟梗长度的测量方法相关研究较少。崔云月等<sup>[3]</sup>提出基于旋转法求取图像中烟梗的最小外接矩形,进而识别出烟梗长度,但该方法旋转次数多,较为耗时,且对于形状较为笔直的烟梗测量较为准确,对于弯曲形状的烟梗测量精度较差。朱文魁等<sup>[4]</sup>采用了一种基于 X 射线透射图像的方法来定量检测烟梗中的长短梗率,但是该方法操作复杂且准确性有待提高。武凯等<sup>[5]</sup>提出了先计算烟梗左右两侧轮廓像素尺寸和的一半,然后依据像素尺寸与物理尺寸的转换关系求出烟梗实际长度的方法。该测量方法对于弧形烟梗的测量相较于矩形法测量更为准确,但对于弯曲情况比较复杂的烟梗,其测量结果误差会有所增大。

为了解决人工测量烟梗误差大、效率低以及传统测量方法的局限性和单一性等问题。本研究提出了一种基于机器视觉的烟梗长度测量的分类测量法。该方法根据烟梗的矩形度差异,对分类后的烟梗分别采用最小外接矩形法和基于骨架提取自适应性宽度的改进 Steger 算法来测量不同形态的烟梗长度。

## 1 系统硬件设计

图 1 为烟梗测量装置硬件图。为了避免烟梗在传送带上出现堆积、重叠的现象,上料时由工人将烟梗均匀平铺在差速带的上层,如图 1(a)所示。差速带与传送带之间形成多级差速,使烟梗落至传送带上时避免堆积与重叠。视觉检测硬件主要包括工业相机、传送带、PC 机和背光光源,如图 1(b)所示。其中,传送带传送被测烟梗物料至检测区域;工业相机采集烟梗图像信息;考虑到本研究是对烟梗长度的测量,并不要求表面信息,因此光源采用背光方式;PC 机主要是用来承载软件程序并显示处理结果。

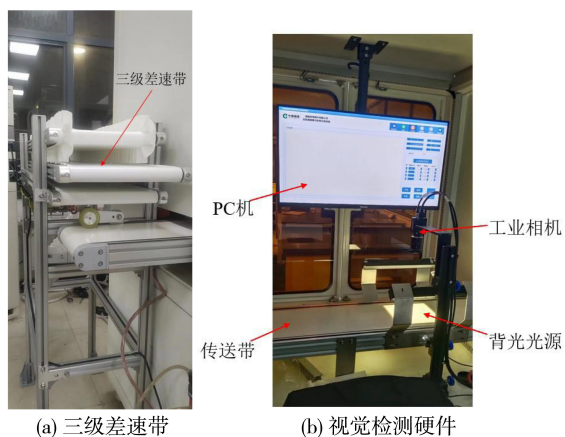


图 1 烟梗测量装置硬件图

Fig.1 Hardware diagram of tobacco stem measuring device

## 2 图像预处理

在图像的拍摄和传输过程中,会不可避免地引入了噪声干扰,对目标物的测量精度产生负面影响。本研究通过中值滤波结合图像开运算消除图像中的噪声点。在使用中值滤波消除图像中的大部分噪声后,对一些残存的噪声使用图像开运算进行二次去噪处理:首先,图像经过腐蚀,去除了噪声,但同时也导致了图像的压缩;接着,对腐蚀处理的图像进行膨胀处理,以还原原始图像的细节,处理前后效果对比如图 2 所示。

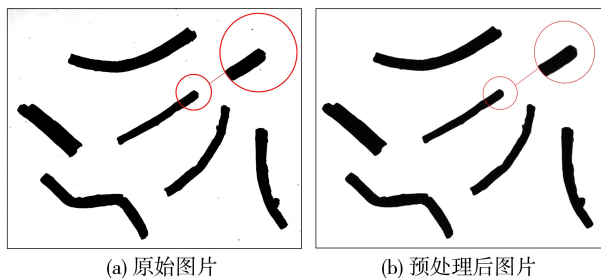


图 2 图像预处理前后对比图

Fig.2 Comparison before and after image preprocessing

由于采用的打光方式为背光,烟梗与背景之间产生了明显的明暗对比。因此采用全局阈值分割法,通过式(1)将整个图像分割为前景和背景。

$$\text{MinGray} \leq g \leq \text{MaxGray} \quad (1)$$

式中,MinGray 表示输入灰度值的下限;MaxGray 表示输入灰度值的上限。

如图 3 所示,烟梗区域灰度值大致分布在 0 至 25 之间,而背景区域灰度值分布在 220 至 255 之间。由于图像灰度直方图呈现双峰特征,因此将烟梗区域的灰度最小值作为输入灰度值下限,

两峰之间谷底的灰度值作为输入灰度值上限。

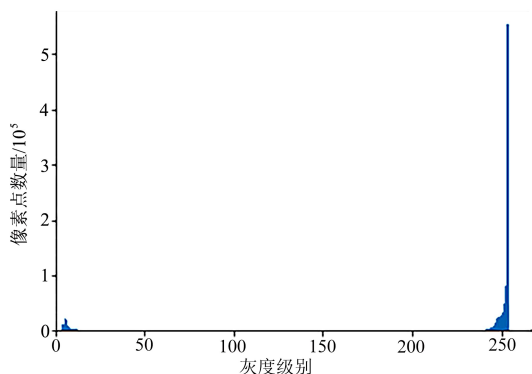


图 3 烟梗灰度分布直方图

Fig.3 Image gray histogram of smoke stems

阈值分割后,相同阈值的像素区域之互连接并不适合后续单个烟梗的处理。因此,利用图像连通性操作对分割后的图像进行处理,如图 4。

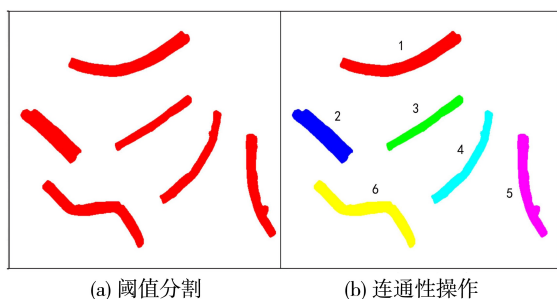


图 4 目标物的分割过程图

Fig.4 Target segmentation process diagram

### 3 不同形态烟梗的长度测量方法

为保证对不同形态烟梗测量的精度,本研究以烟梗矩形度为依据,将不同形态的烟梗分为矩形梗与异形梗。在烟梗物料中常见的不同形状特征的典型烟梗形态如图 5 所示。

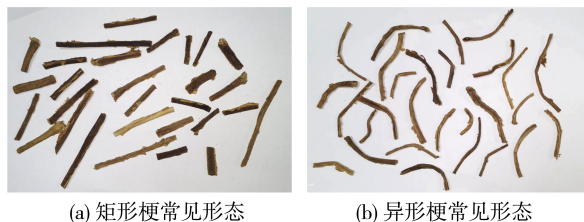


图 5 不同形状的烟梗

Fig.5 Different shapes of tobacco stems

本研究对于异形梗,提出一种基于骨架提取自适应宽度的改进 Steger 算法进行测量;对于矩形梗,将最小外接矩形的长边作为烟梗的测量长度。算法流程如图 6 所示。

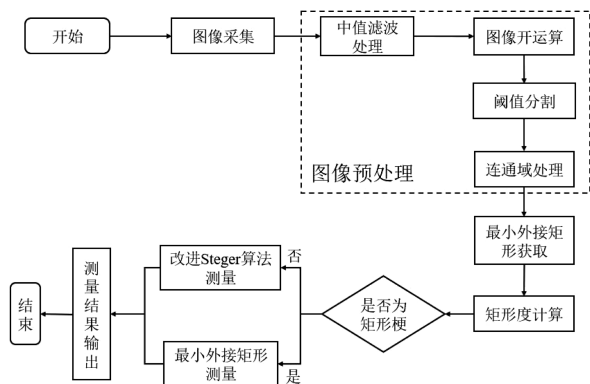


图 6 算法流程图

Fig.6 Algorithm flow chart

#### 3.1 最小外接矩形的获取以及矩形度的计算

几何图形的最小外接矩形是唯一的,在一定程度上能够反映几何图形的长度、宽度以及倾角等参数<sup>[6]</sup>。一般图像中对物体的外接矩形获取常采用等间隔搜索法,即将图像物体在  $90^\circ$  范围内等间隔地旋转,每次记录其轮廓在坐标系方向上的外接矩形参数,通过计算外接矩形面积求其最小外接矩形,如图 7(a) 所示。为了得到较精确的最小外接矩形,该方法需要将旋转角度尽可能地减小,但是其旋转次数将随旋转角度反比例增加,从而占用更多的时间,很难满足实时性需求。因此,为了减少算法运算量,节省算法时间,现采用基于物体的凸包来对目标物的最小外接矩形进行快速求取。最小外接矩形获取原理如图 7。

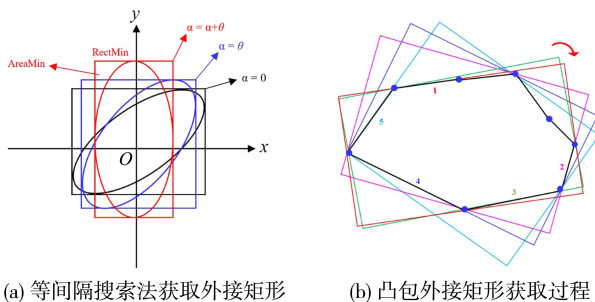


图 7 最小外接矩形获取原理图

Fig.7 Schematic diagram for obtaining minimum circumscribed rectangle

由于物体凸多边形的最小外接矩形至少有一条边与凸多边形的一条边共线,如图 7(b) 所示,因而可有效地限制外接矩形的可能范围<sup>[7]</sup>。所以无需由等间隔搜索法去检测所有可能的方向,只需搜索与多边形边数数量相等的外接矩形,并计算出相应矩形面积,输出最小面积外接矩形的

相关参数,从而得到该目标物的最小外接矩形。烟梗外接矩形获取及矩形度的计算如图 8 所示。

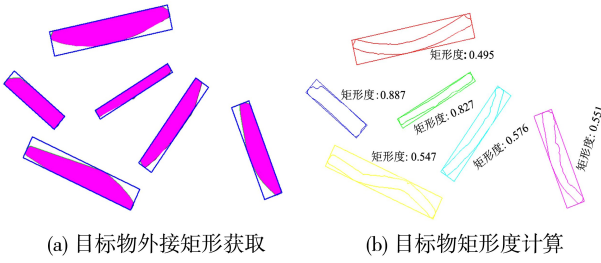


图 8 烟梗外接矩形获取及矩形度的计算

Fig.8 Tobacco stem circumscribed rectangle obtaining and rectangularity calculation

矩形度是用来反映一个物体与标准矩形的相似程度的参数,其计算公式为:

$$R = S_0 / S_{MER} \quad (2)$$

式中, $R$  为物体矩形度; $S_0$  为目标物面积,  $\text{mm}^2$ ; $S_{MER}$  为最小外接矩形面积,  $\text{mm}^2$ 。

矩形度的数值范围通常为  $0 \sim 1$ , 矩形度值越大, 物体形状就越接近矩形。如图 8(b) 所示, 通过对不同烟梗的矩形度实际检测可知, 当烟梗的矩形度大于 0.8 时, 其形状接近于矩形, 而异形梗由于形状不规则, 矩形度小于 0.8。因此, 本研究将矩形度 0.8 作为区分矩形梗与异形梗的分界值。对于矩形度大于 0.8 的烟梗, 由最小外接矩形的长边通过式(3)计算得到烟梗实际长度。

$$L = \text{pix} \times N \quad (3)$$

式中, $L$  表示烟梗物理长度,  $\text{mm}$ ;  $\text{pix}$  表示单个像素尺寸大小,  $\text{mm}$ ;  $N$  表示像素个数。

### 3.2 异形梗长度测量

异形梗由于形状较为复杂且不规则, 在不同的弯曲部分具有不同的曲率。测量时受到测量工具的限制, 使用直尺或测量带等工具难以适应弯曲表面, 使得对异形梗长度的测量更加困难。若直接采用最小外接矩形法测量, 则测量结果与实际值有很大的出入。所以, 为准确测量异形梗的长度, 本研究采用基于骨架提取宽度的改进 Steger 算法对异形梗提取中心线进行测量。

#### 3.2.1 Hessian-Steger 算法原理

Steger 算法以 Hessian 矩阵为基础, 用于提取光条中心线<sup>[8]</sup>。在理想光条横截面上, 灰度值通常呈对称高斯分布, 灰度值最大点即为光条的中心点。因此, 在光条法线方向上, 可利用泰勒多项式展开的灰度分布函数, 精确求取光条中心的亚

像素位置。

在二维图像  $U(r, c)$  中, 线条中心点的法线方向可通过计算 Hessian 矩阵的特征值与特征向量确定。Hessian 矩阵可以表示为:

$$\mathbf{H}(r, c) = \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 G(r, c)}{\partial r^2} & \frac{\partial^2 G(r, c)}{\partial r \partial c} \\ \frac{\partial^2 G(r, c)}{\partial r \partial c} & \frac{\partial^2 G(r, c)}{\partial c^2} \end{bmatrix} \otimes U(r, c) = \begin{bmatrix} I_{rr} & I_{rc} \\ I_{rc} & I_{cc} \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中, $r, c$  为像素的行列坐标。函数  $U(r, c)$  为像素点  $(r, c)$  处的灰度值; $I_{rr}, I_{rc}, I_{cc}$  为  $U(r, c)$  与二维高斯函数  $G(r, c)$  通过卷积计算得到的。函数  $G(r, c)$  为二维高斯函数, 主要是因为突出目标物的灰度分布特性, 其表达式为:

$$G(r, c) = -\frac{r^2 + c^2}{2\sigma^3 \sqrt{2\pi}} \quad (5)$$

式中, $\sigma$  为高斯函数的标准差。 $\sigma$  的取值应满足  $\sigma \geq D/\sqrt{3}$  ( $D$  为被测物的宽度)。为确保高斯函数的准确性,  $\sigma$  的最小允许值应满足  $\sigma \geq D/2.5$ 。

在二维图像中, 通过计算矩阵中绝对值较大的特征向量, 可确定像素点  $(r_0, c_0)$  的法线方向<sup>[9]</sup>。假设法线方向的单位向量为  $\mathbf{e} = [e_r, e_c]$ , 则在该方向上的像素点可表示为  $(r_0 + te_r, c_0 + te_c)$ 。该点处的灰度值二阶泰勒多项式展开可表示为:

$$I(r_0 + te_r, c_0 + te_c) = I(r_0, c_0) + t\mathbf{e} [I_r, I_c]^T + \frac{t^2}{2!} \mathbf{e} \mathbf{H}(r, c) \mathbf{e}^T \quad (6)$$

由于在理想状态下越靠近光条中心点的像素灰度值越大。因此, 通过式(6)计算法线方向上的灰度分布函数的一阶导数零点, 可得到该方向上的中心点坐标:

$$\frac{\partial I}{\partial t} = \mathbf{e} \cdot [I_r, I_c] + t \cdot \mathbf{e} \cdot \mathbf{H}(r, c) \cdot \mathbf{e}^T = 0 \quad (7)$$

式(7)改写成矩阵形式为:

$$[e_r, e_c] \cdot \begin{bmatrix} I_r \\ I_c \end{bmatrix} + t [e_r, e_c] \begin{bmatrix} I_{rr} & I_{rc} \\ I_{rc} & I_{cc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_r \\ e_c \end{bmatrix} = 0 \quad (8)$$

进一步化简可得:

$$t = -\frac{e_r I_r + e_c I_c}{e_r^2 \cdot I_{rr} + 2 \cdot e_r \cdot e_c \cdot I_{rc} + e_c^2 \cdot I_{cc}} \quad (9)$$

联合式(7)~式(9)求解中心点的位置为  $(r_0 + te_r, c_0 + te_c)$ 。

传统 Steger 算法在提取中心线时,要求高斯函数的标准差值  $\sigma$  应满足约束条件  $\sigma \geq \sqrt{3}$ 。但在处理不同宽度的被测物时,该约束条件仍基于先前固定宽度来计算  $\sigma$  值,导致不同宽度被测物的初始中心点均要满足该约束条件<sup>[10]</sup>。对应于不同宽度被测物的二阶导无法保证取得极小值,从而造成不同被测物的中心线断连、缺失,对测量结果造成影响,如图 9 所示。

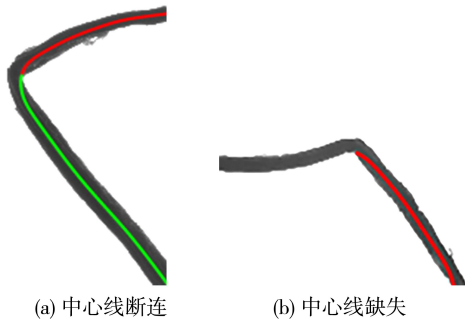


图 9 传统 Steger 算法对不同宽度烟梗的测量

Fig.9 Measurement of tobacco stems with different widths by traditional Steger algorithm

### 3.2.2 自适应宽度 Hessian-Steger 算法

由于传统 Steger 算法在提取目标物中心带点时,需要对每个像素点进行 5 次高斯卷积操作,导致 Steger 算法的计算量显著增加<sup>[11]</sup>。为减少算法的计算量,在对图像进行阈值分割后,采用 Mask 掩膜法裁剪非目标区域后,再对目标图像进行卷积操作。

选择合适的烟梗宽度对于确定最佳  $\sigma$  值至关重要,本研究通过计算烟梗骨架垂线与轮廓交集的平均长度来计算最佳  $\sigma$  值。图像骨架是由单个像素点组成的目标中轴,它有效反映了原物体形状的连通性和拓扑结构<sup>[12]</sup>。本研究采用火烧方式的形态学细化法提取骨架。在得到分割图像后,选择合适的结构元素  $B$  从目标区域边缘开始腐蚀,并保留腐蚀结果。然后用结构元素  $B$  对腐蚀后的图像进行开运算,并计算腐蚀运算与开运算的差,循环往复,直至获得所求骨架。其求取表达式为:

$$S(X) = \bigcup_{n=0}^N S_n(X) \quad (10)$$

$$S_n(X) = (X \ominus nB) - [(X \ominus nB) \circ B] \quad (11)$$

其中,  $S(X)$  为目标物  $X$  的骨架;  $S_n(X)$  表示目标物  $X$  的第  $n$  个骨架子集;  $N$  为目标物  $X$  被  $(X \ominus nB)$  腐蚀成空集前的最后一次迭代次数。

在式(11)中,  $(X \ominus nB)$  为连续  $n$  次对目标物  $X$  使用结构元素  $B$  腐蚀,即:

$$(X \ominus nB) = ((\dots(X \ominus B) \ominus B) \ominus B \dots) \ominus B \quad (12)$$

由于烟梗物理形状的影响,通常难以确定提取骨架的主干路径,导致所提取骨架可能出现分支的现象。为此,本研究通过对烟梗骨架节点与骨架作差集所得到的骨架段进行长度筛选来剔除骨架分支。在骨架中,对于任意的骨架点  $P$ ,若与之相连的像素点超过 3 个,则称该像素点为骨架节点<sup>[13]</sup>。图 10(b)展示了图 10(a)中位置 1 处骨架节点的提取。

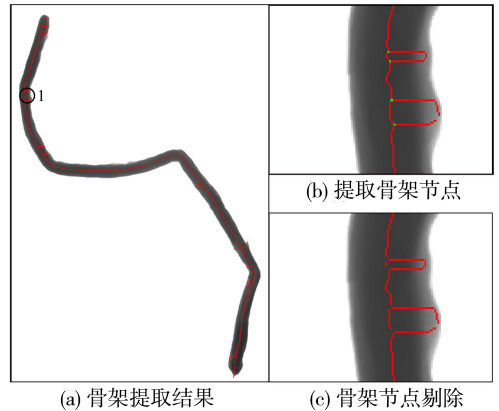


图 10 骨架节点的剔除过程

Fig.10 Skeleton node removal process

在提取到骨架中的所有节点后,通过式(13)将烟梗骨架节点与骨架作差集运算,可将二者分离,如图 10(c)所示。

$$A - B = \{x \mid x \in A \text{ 且 } x \notin B\} \quad (13)$$

式中,  $A$  为提取骨架的像素集合;  $B$  为骨架节点的像素集合;  $x$  是属于  $A$  集合但不属于  $B$  的像素。

由于在各骨架段中,骨架分支的像素长度远小于主干长度。因此利用骨架段间长度的差异,剔除骨架分支。假设对各段骨架像素长度的统计集合为  $L_N$ ,由式(14)可筛选出骨架段最大长度。

$$\max(L_N) = \max\{l_1, l_2, \dots, l_n\} \quad (14)$$

骨架主干提取如图 11(a)所示。对于骨架垂线的提取,首先选择点集中首个坐标点作为直线段的起始点,并定义一个固定的距离步长。之后沿着点集中的坐标点前进,当累积的距离达到设定的步长时,生成新的固定长度直线段。最后,移动并重复上述步骤,直至完全遍历整个骨架主干点集。在此过程将产生一系列直线段,每个线段

都与前一个线段具有相同的长度,如图 11(b)所示。

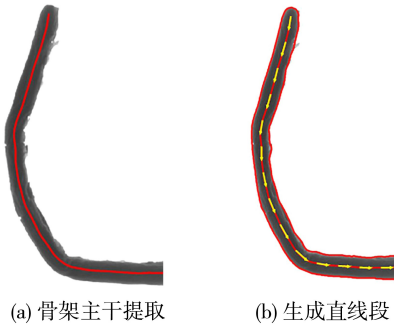


图 11 骨架直线段提取

Fig.11 Skeleton linear segment extraction

接着,通过每个直线段的中点位置确定该直线段的垂线。由式(15)利用直线段的起点和终点坐标,可计算直线段的中点坐标位置:

$$\begin{cases} R_M = (R_1 + R_2) / 2 \\ C_M = (C_1 + C_2) / 2 \end{cases} \quad (15)$$

其中,  $(R_1, C_1)$  为直线段起点坐标;  $(R_2, C_2)$  为直线段终点坐标;  $(R_M, C_M)$  为直线段中点。

假设直线段与水平轴之间的夹角为  $\alpha$ , 垂线的固定长度为  $l$ 。通过式(16)可计算出该直线段的垂线在图像中的起点和终点坐标,提取的直线段垂线如图 12(a)所示。

$$\begin{cases} R_S = R_M - \cos(\alpha) \times l \\ C_S = C_M - \sin(\alpha) \times l \end{cases}, \begin{cases} R_E = R_M + \cos(\alpha) \times l \\ C_E = C_M + \sin(\alpha) \times l \end{cases} \quad (16)$$

式中,  $(R_S, C_S)$  为垂线起点坐标;  $(R_E, C_E)$  为垂线终点坐标。

最后通过计算垂线与被测烟梗区域交集的像素长度,如图 12(b)所示,计算所有直线段宽度  $D$  的平均值,作为 Steger 算法计算高斯函数标准差  $\sigma$  所需的宽度值,以满足不同宽度烟梗中心线的提取测量要求。

## 4 实验与分析

为进一步验证本研究所提分类测量法在烟梗测量中的准确性和稳定性,以三坐标测量仪测量的烟梗长度为标准值,并通过相机标定将烟梗像素长度转换为物理长度。在相同的试验环境下,采用分类测量法、传统 Steger 算法以及剔除分支后的骨架提取法分别对 15 组矩形梗与异形梗的

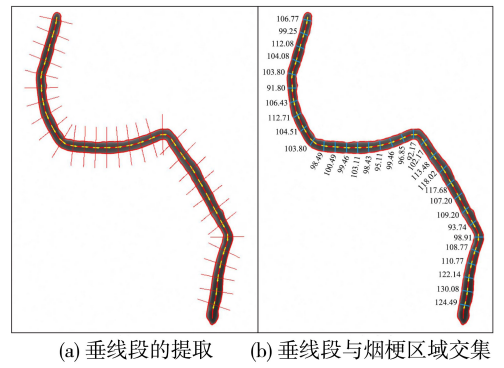


图 12 烟梗宽度的提取

Fig.12 Extraction of stem width

相对误差进行分析,以评估不同方法的测量性能。此外,为分析算法的稳定性,分别对 5 组不同长度矩形梗与异形梗的单根样品进行多次测量,通过对比同一目标物测量结果的差异,从而分析算法的稳定性。

### 4.1 不同方法对矩形梗的测量

采用骨架测量法、传统 Steger 算法以及所提分类测量法对不同长度的矩形烟梗的测量相对误差结果如表 1 所示。

从表 1 可见,传统 Steger 算法和矩形法测得的矩形梗长度的相对误差较小。其中,传统 Steger 算法与矩形法的最大相对误差值分别为 4.58% 和 -0.196%, 远远小于骨架测量的 17.59%。尽管传统 Steger 算法的测量相对误差虽小于骨架提取法,但与本研究所提分类测量法相比仍存在较大的误差。

在算法耗时方面,骨架测量法、传统 Steger 算法与本研究中的分类测量法总耗时分别为 4.68、35.74 和 6.09 s。虽然骨架提取法耗时最短,但是其测量精度与另外两种方法相比较差。而传统 Steger 算法测量精度远高于骨架提取法,但是其耗时明显远超其它两种方法。本研究所提分类测量法在算法耗时方面略长于骨架提取法,但测量相对误差却远远低于骨架提取法。综上,采用分类测量法对矩形梗测量效果要明显优于另外两种方法。

### 4.2 不同方法对异形梗的测量

采用骨架测量法、传统 Steger 算法以及所提分类测量法对不同长度的异形烟梗进行测量,相对误差结果如表 2 所示。

表 1 不同测量方法对矩形梗的测量结果

Tab.1 Measurement results of rectangular stems by different methods

序号	实际长度/mm	骨架法 测量值/mm	Steger 法 测量值/mm	分类测量 法测量值/mm	骨架法 相对误差/%	Steger 法 相对误差/%	分类测量法 相对误差/%
1	22.42	20.38	21.92	22.44	9.10	2.23	-0.090
2	24.92	23.31	25.36	24.9	6.46	-1.77	0.080
3	26.10	24.70	26.05	26.12	5.36	0.19	-0.080
4	27.12	22.35	26.77	27.13	17.59	1.29	-0.040
5	30.22	25.49	29.16	30.20	15.66	3.51	0.070
6	32.86	28.77	32.47	32.88	12.45	1.19	-0.060
7	35.78	33.9	35.45	35.78	5.25	0.92	0.006
8	37.32	36.44	37.99	37.36	2.36	-1.80	-0.110
9	39.90	35.46	38.59	39.92	11.13	3.28	-0.050
10	40.88	40.35	40.94	40.96	1.30	-0.15	-0.196
11	41.52	40.38	39.62	41.56	2.75	4.58	-0.096
12	43.64	42.6	44.31	43.67	2.38	-1.54	-0.069
13	49.72	53.31	49.78	49.70	-7.22	-0.12	0.040
14	51.12	48.62	50.33	51.13	4.89	1.55	-0.020
15	74.44	69.64	72.99	74.47	6.45	1.95	-0.040

表 2 不同方法对异形梗的测量结果

Tab.2 Measurement results of curved tobacco stems by different methods

序号	实际长度/ mm	骨架法 测量值/mm	Steger 法 测量值/mm	分类测量 法测量值/mm	骨架法 相对误差/%	Steger 法 相对误差/%	分类测量法 相对误差/%
1	34.82	33.67	34.81	34.85	3.3	0.029	-0.090
2	40.00	38.40	39.85	40.00	4.00	0.38	0
3	56.04	54.62	56.16	56.03	2.53	-0.22	0.018
4	60.20	59.33	60.47	60.24	1.45	-0.45	-0.070
5	67.22	66.94	67.49	67.26	0.42	-0.402	-0.060
6	76.42	75.41	76.64	76.40	1.32	-0.29	0.026
7	82.82	81.36	82.93	82.73	1.76	-0.13	0.109
8	93.84	91.35	96.04	93.82	2.65	-2.34	0.021
9	97.46	95.82	98.30	97.49	1.68	-0.86	-0.031
10	102.70	102.35	101.56	102.66	0.34	1.11	0.039
11	105.02	103.87	104.59	104.98	1.10	0.41	0.038
12	107.54	105.93	107.79	107.55	1.50	-0.23	-0.009
13	110.26	109.22	108.91	110.22	0.94	1.22	0.036
14	111.40	110.79	111.62	111.39	0.55	-0.197	0.009
15	121.18	120.23	121.35	121.28	0.78	-0.14	-0.083

从表 2 可见,采用骨架提取法、分类测量法和传统 Steger 算法测得的长度值最大相对误差分别为 4%、-0.109% 与 -2.34%。其中,骨架提取法的测量值与实际值相差较大。这是由于测量长度受多余骨架分支长度的影响,导致测量长度大于其实际长度。尽管传统 Steger 算法的测量相对误差小于骨架提取法,但相较于分类测量法其测量精度还有待提升。

此外,骨架测量法、传统 Steger 算法与分类测量法的测量总耗时分别为 3.95、39.74、12.56 s。

骨架提取法耗时明显小于另外两种方法,这是由于骨架提取法只需对烟梗所在灰度区域的中线进行粗略拟合测量。而传统 Steger 算法的总耗时最长,其测量精度与改进方法相比较差。因此,对于异型梗的测量,分类测量法的精度更高、测量效率更好,也具有较好的优势。

#### 4.3 算法的测量稳定性分析

利用所提分类测量法对不同形态、不同长度的烟梗进行多次测量,结果如表 3 所示。

表 3 分类测量法对不同长度烟梗的多次测量结果

Tab.3 Multiple measurement results of tobacco stems with different lengths by classification measurement method

形态	原始长度	第 1 次测量值	第 2 次测量值	第 3 次测量值	第 4 次测量值	最大误差
矩形梗	27.623	27.618	27.618	27.626	27.617	0.006
	34.341	34.347	34.348	34.347	34.338	0.007
	30.296	30.297	30.304	30.298	30.291	0.008
	20.282	20.281	20.284	20.284	20.282	0.004
	40.591	40.593	40.594	40.593	40.590	0.003
异形梗	43.000	43.003	43.006	43.005	43.006	0.006
	33.261	33.262	33.266	33.264	33.265	0.005
	18.933	18.932	18.930	18.937	18.934	0.004
	55.322	55.326	55.328	55.323	55.323	0.006
	68.531	68.533	68.532	68.531	68.530	0.003

从表 3 可见,使用所提分类测量法对矩形梗进行多次测量的最大误差为 0.008 mm,对异形梗的最大测量误差为 0.006 mm,且无论是对矩形梗还是对异形梗的多次测量,误差的最大值均小于 0.010 mm,可见所提方法具有较好的稳定性。

## 5 结束语

针对不同形态烟梗的准确测量问题,本研究通过机器视觉技术分别采用基于旋转外接矩形和

改进 Steger 算法对不同形态的烟梗进行分类测量。实验结果表明,所提的分类测量法的测量精度和速度明显优于其它两种方法,且具有较好的测量稳定性,能够准确、实时的测量出不同形状烟梗的长度。此外,所提方法相较于传统的人工测量,极大地提升了测量精度与效率,降低了企业的人工成本,能够满足实际的生产需求,对烟草行业以及其它相关领域的自动化在线测量具有重要的实际意义。

## 参考文献:

- [1] 李晓,周利军,纪晓楠,等.不同尺寸规格的烟梗吸湿特性及梗丝质量的影响[J].西南农业学报,2017,30(3):675-680.
- [2] 杨洋,杨雨波,吴昊,等.烟草加工中打叶复烤工艺参数优化[J].农业工程,2018,8(8):83-85.
- [3] 崔云月,管一弘,孙娜,等.BP 神经网络在烟梗长短梗率检测中的应用[J].软件导刊,2021,20(2):63-67.

filled open-hole tubes[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2022(224): 224.

- [8] 黄晶,龙永程,曹娇,等. 泡沫铝材料参数反求及其填充锥形薄壁管的吸能性能研究[J]. *机械科学与技术*, 2017, 36(5): 798-804.
- [9] YAO R, PANG T, HE S, et al. A bio-inspired foam-filled multi-cell structural configuration for energy absorption[J]. *Composites, Part B. Engineering*, 2022(1): 238.
- [10] 肖晓春,朱恒,徐军,等. 含泡沫铝填充多胞方管吸能立柱防冲特性数值研究[J]. *煤炭科学技术*, 2023, 51(10): 302-311.
- [11] 闫晓刚,张勇,林继铭,等. 新颖圆形多胞复合填充结构的耐撞性[J]. *复合材料学报*, 2018, 35(8): 2166-2176.
- [12] SUN G, LIU T, HUANG X, et al. Topological configuration analysis and design for foam filled multi-cell tubes[J]. *Engineering Structures*, 2018, 155(15): 235-250.
- [13] ZHENG G, WU S Z, SUN G Y, et al. Crushing analysis of foam-filled single and bitubal polygonal thin-walled tubes[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2014, 87: 226-240.
- [14] 曾繁波. 泡沫铝填充管的吸能特性研究及其在轿车前纵梁结构中的应用[D]. 广州:华南理工大学, 2014.

(责任编辑: 陈雯)

(上接第 81 页)

- [4] 朱文魁,郭高飞,丁美宙,等. 一种基于 X 射线透射图像定量检测烟梗中粗梗率和长短梗率的测定方法: CN108007945A[P]. 2018-05-08.
- [5] 武凯,熊文,卢婷,等. 一种烟梗长度或直径的检测方法: CN115031667A[P]. 2022-09-09.
- [6] 雷光钰. 基于红外热波的缺陷自动检测识别与评估方法研究[D]. 成都:电子科技大学, 2022.
- [7] 代长安,区昊辰,朱鼎天,等. 不规则多边形区域搜索航路规划算法[J]. *工业技术创新*, 2021, 8(6): 102-106, 112.
- [8] 曾凯,刘贺飞,何茜,等. 基于改进 Steger 算法的线结构光中心提取[J]. *华北理工大学学报(自然科学版)*, 2021, 43(1): 101-107.
- [9] 王志永,于宇,王武越,等. 基于改进 Steger 算法流程的线激光中心提取[J]. *电子测量技术*, 2023, 46(1): 84-89.
- [10] GIULIETTI N, CHIARIOTTI P, REVEL G M. Automated measurement of geometric features in curvilinear structures exploiting Steger's algorithm[J]. *Sensors*, 2023, 23(8): 4023.
- [11] 南方,李大华,高强,等. 改进 Steger 算法的自适应光条纹中心提取[J]. *激光杂志*, 2018, 39(1): 85-88.
- [12] 刁智华,吴贝贝,毋媛媛,等. 基于图像处理的骨架提取算法的应用研究[J]. *计算机科学*, 2016, 43(S1): 232-235.
- [13] 张国栋,韩佳池. 基于模糊距离变换的骨架剪枝算法[J]. *沈阳航空航天大学学报*, 2012, 29(1): 64-69.

(责任编辑: 方素华)