

基于特征提取与空间定位的菠萝内刺检测技术

李莹, 袁浩*, 王凯彬, 何自芬, 董耀

昆明理工大学机电工程学院, 云南 昆明 650500

摘要 针对菠萝削皮流水线生产加工过程中菠萝表面有内刺残留,需要人工二次去除内刺的问题,采用图像处理的方法对菠萝内刺进行特征提取与空间定位,从而确定菠萝内刺的精确位置,以实现菠萝内刺的自动化去除。设计了菠萝图像采集系统以及针对当前系统的菠萝内刺检测算法。对菠萝图像进行预处理,将内刺特征从背景中分离出来剔除干扰特征,并将内刺的轮廓作为提取特征。轮廓的面积和轮廓的圆度作为描述子,菠萝内刺轮廓最小外接矩形的中心坐标作为菠萝内刺在图像中的位置,利用菠萝外轮廓将内刺的二维坐标转换成三维坐标从而精确定位菠萝内刺。对比实验表明:菠萝内刺检测算法准确率明显高于传统的斑点检测算法,内刺中心位置拟合精度较高,检测最大误差为 0.63 mm,平均检测误差为 0.33 mm。研究表明,平均检测速度和精度都能满足菠萝内刺去除工序的需要,这为菠萝流水线加工过程中的内刺去除提供一定的技术基础。

关键词 图像处理; 目标检测; 特征提取; 空间定位; 坐标转换

中图分类号 TP391 **文献标志码** A

DOI: 10.3788/LOP231299

Detection Technology of Pineapple Thorn Based on Feature Extraction and Space Position

Li Ying, Yuan Hao*, Wang Kaibin, He Zifen, Dong Yao

Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Kunming University of Science and Technology,
Kunming 650500, Yunnan, China

Abstract During the production and processing of pineapple peeling line, inner thorns remain on the pineapple surface, which require manual secondary removal. To address this, an image processing method is adopted to extract features and spatially locate the inner thorns of pineapple, to determine their precise location for automatic removal of the thorns. Accordingly, a pineapple image acquisition system and a corresponding pineapple inner thorn detection algorithm are designed. The pineapple image is preprocessed to separate the inner thorn features from the background, eliminating the interfering features, and the contour of the inner thorn is used as the extracted feature. The area of the contour and the roundness of the contour are used as descriptors, and the center coordinates of the smallest outer rectangle of the pineapple inner thorn contour are used as the position of the pineapple inner thorn in the image, while the outer contour of the pineapple is used to convert the two-dimensional coordinates of the inner thorn into three-dimensional coordinates to precisely locate the pineapple inner thorn. The comparison experiments show that the accuracy of the pineapple inner thorn detection algorithm is significantly higher than that of the traditional speckle detection algorithm. In addition, the accuracy of fitting the center of the inner thorn is higher, with the maximum detection error of 0.63 mm and average detection error of 0.33 mm. The study shows that the average detection speed and accuracy can meet the needs of the pineapple inner thorn removal process, which provides a certain technical basis for the inner thorn removal in pineapple assembly line processing.

Key words image processing; target detection; feature extraction; spatial positioning; coordinate transformation

1 引言

菠萝口味独特,有着较高的营养价值,深受人们的

喜爱。菠萝主要被加工成罐头,果干以及鲜食进行销售,销量广泛,同时也成为国家经济发展的重要产业^[1]。因此菠萝市场发展前景较大^[2]。菠萝加工首先

收稿日期: 2023-05-12; 修回日期: 2023-05-31; 录用日期: 2023-06-05; 网络首发日期: 2023-06-15

基金项目: 国家自然科学基金(62171206)

通信作者: *1204716405@qq.com

要对菠萝进行去皮,菠萝的外皮坚硬含刺,有农药残留,必须去皮后食用,但是菠萝外皮结构特殊,去皮时除了要切除表皮,还要去除嵌入果肉中的内刺^[3]。菠萝内刺指的是菠萝表皮向内生长并镶嵌在果肉中的植物表皮细胞,不可食用。在食用前需要将表皮和内刺去除,目前工业生产流水线上主要采用定尺寸刀对菠萝切削去皮,切削时直接将果皮与内刺同时去除,果肉浪费严重,有内刺残留,需要手工进行二次去除。

为了提高果肉保留率,实现菠萝内刺的精准自动化去除,就需要确定内刺加工设备的空间位置。目前国内外关于菠萝内刺图像识别的研究较少,菠萝内刺识别主要有以下几方面难点:首先,受到环境因素的干扰以及菠萝的外皮残留会造成菠萝内刺图像的误识别;其次,由于菠萝内刺越靠近中心点内刺的深度越深,为了能够精准去除内刺,减少果肉浪费,所以菠萝内刺识别对中心点的拟合程度要求较高;传统的图像识别算法对图像边缘的内刺容易造成误识别和重复识别;最后,为了能够进一步加工菠萝,需向加工设备提供菠萝内刺的三维坐标,现有的图像识别算法三维目标检测方法计算量较大,检测成本较高且不适合直接应用在菠萝内刺检测中。

针对上述在菠萝内刺图像识别中的难点,本文首先通过中值滤波、全局化阈值和形态学处理对菠萝图像进行处理,剔除了相关的干扰信息,然后通过提取连通区域轮廓,去除不满足要求的内刺轮廓,从而剔除了菠萝边缘的内刺特征^[4],之后构建并寻找内刺轮廓特征的最小外接矩形的中心,并用最小外接矩形的内接椭圆将检测到的内刺圈出,使得内刺的中心拟合程度较高,之后通过坐标转换将二维坐标转化为三维坐标,这为菠萝削皮设备去除菠萝内刺提供加工数据,该方法具有一定的理论研究意义和应用价值。

2 图像采集系统

视觉检测系统通常包括两个部分:图像采集和图像处理。图像采集系统决定了图像的质量,图像的质量会影响图像处理算法的复杂程度、检测精度以及检测速度^[5]。图像采集系统影响图像质量的主要因素有相机,镜头和光源,针对菠萝内刺位置测量的要求对图像采集系统进行了选型设计。

工业相机是将光学信号转换成数字信号的传感器。此次实验针对菠萝内刺检测,选择 COMS 感光元件,COMS 感光元件除了制作成本低外,还具有集成度较高,体积小、能耗小、成本低等优点;线阵相机的感光元件排列在一条直线上,拍摄的图像是将一行一行的像素按照拍摄的顺序拼接后再输出成二维图像。面阵相机的感光元件是矩阵型,可以直接获得一幅二维图像;线阵相机对面阵相机成像过程更为繁琐,要将图像中像素点的位置与物体实际位置相对应,必须配

备光栅、编码器等器件激励相机获取行像素,而且图像精度受运动物体的运动精度影响,拍摄时间较长,测量效率较低,所以选择面阵相机来获取菠萝图像。面阵相机的快门按照成像方式分为卷帘扫描式和全局快门,两种快门获得图像的质量相差不大,但拍摄运动物体时,卷帘快门因为获取行像素时存在时间间隔,这会造成成像失真或模糊,因为菠萝在拍摄时运动速度较快,所以选择全局快门的拍摄方式。相机还可以根据获取图像的颜色分为彩色相机和灰度相机,彩色相机的感光元件分为红、绿、蓝 3 种颜色,成像时像素颜色会根据周围感光元件的色彩信息来判断丢失的两种颜色。灰度相机感光元件会直接接受所有光照信息来成像。相同分辨率的情况下灰度相机成像会比彩色相机成像更清晰,因为菠萝去皮后果肉与内刺的亮度对比明显,综上所述,选择采用 CMOS 面阵全局快门灰度相机来获得图像。经过综合考虑,选择相机型号为金乾象 KS1A293。

图像采集系统的成像精度还与拍摄距离有关,为了获取更清晰的图像,还需要设置合理的物距,已知菠萝的最大长度和最大直径分别为 160 mm 和 120 mm,检测精度为 0.2 mm。检测距离为 250 mm。

$$P = \frac{H}{D}, \quad (1)$$

式中: H 为物体的最大长度; D 为检测精度; P 为最大长度对应的像素个数。利用式(1)计算出最小分辨率为 $800 \times 600 = 48$ 万,实际使用时需有更多的像素来保证检测精度,取最小分辨率的 2 倍 96 万作为相机像素,将分辨率圆整为常见值 100 万。

对相机而言,菠萝位置是固定不变的,所以选择定焦镜头。现在已有焦距为 3.6 mm 的定焦镜头,计算相机物距过程,已知镜头焦距为 3.6 mm、相机靶面尺寸 $3.64 \text{ mm} \times 2.4 \text{ mm}$ 和视场大小为 $150 \text{ mm} \times 240 \text{ mm}$ 。

$$D = \frac{fW}{w}, \quad (2)$$

式中: f 为焦距; D 为物距; W 为视场短边长度; w 为相机靶面短边尺寸。根据式(2)可以计算出物距为 225 mm。

3 菠萝内刺检测算法

3.1 菠萝内刺目标检测流程

利用图像采集系统获取图像,首先对图像进行滤波、灰度图转换成二值图以及图像形态学处理等预处理操作^[6],剔除原始图像中绝大部分干扰信息,获得二值图像;然后对二值图进行连通域分析,提取各个连通区域的轮廓作为内刺特征,计算菠萝内刺特征的圆度值和面积值,剔除圆度和面积不符合要求的内刺特征,最后计算出每一个内刺特征的最小外接矩形的中心点,用中心点位置表示菠萝内刺在图像中的位置^[7],菠萝内刺检测流程如图 1 所示。

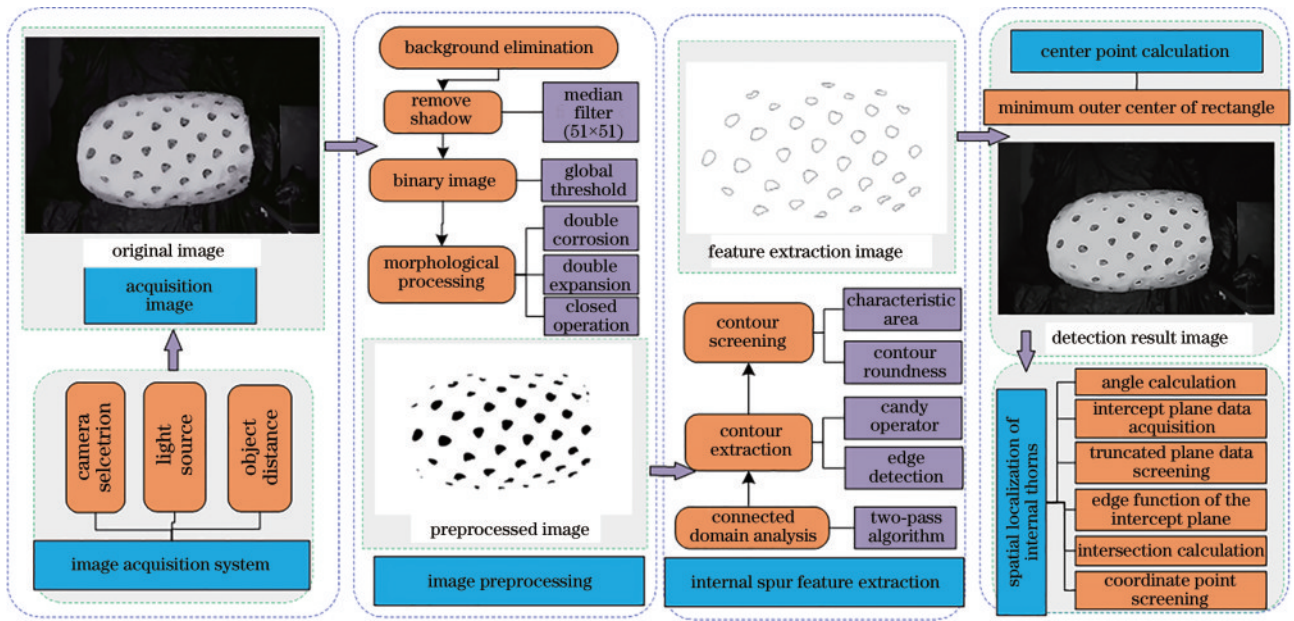


图 1 菠萝内刺检测流程图

Fig. 1 Flow chart of pineapple thorn detection

3.2 预处理

3.2.1 剔除背景

利用菠萝在图像中较亮的特点将菠萝与背景分开。对图像 I_0 进行灰度直方图统计, 利用灰度直方图计算出阈值 T 。灰度值大于等于 T 取值为 0, 反之保留原来灰度值。计算过程可表示为

$$\begin{cases} h(i, j) = f(i, j), f(i, j) < T \\ h(i, j) = 0, f(i, j) \geq T \end{cases}, \quad (3)$$

$$g(i, j) = f(i, j) - h(i, j), \quad (4)$$

式中: $h(i, j)$ 为掩模图像 (i, j) 处的像素值, i 为第 i 行像素, j 为第 j 列; $f(i, j)$ 为原始图像 (i, j) 处的像素值; $g(i, j)$ 为分割后的图像 (i, j) 处的像素值。

按照式 (4) 将掩模图像与原图像进行差运算, 剔除背景信息, 得到图像 I_1 , 如图 2 所示。



图 2 剔除背景后的图像

Fig. 2 Image with background removed

3.2.2 消除阴影

利用均值滤波器、高斯滤波器和均值滤波器分别对 I_1 图像进行处理, 处理结果如图 3 所示^[8], 相同尺寸

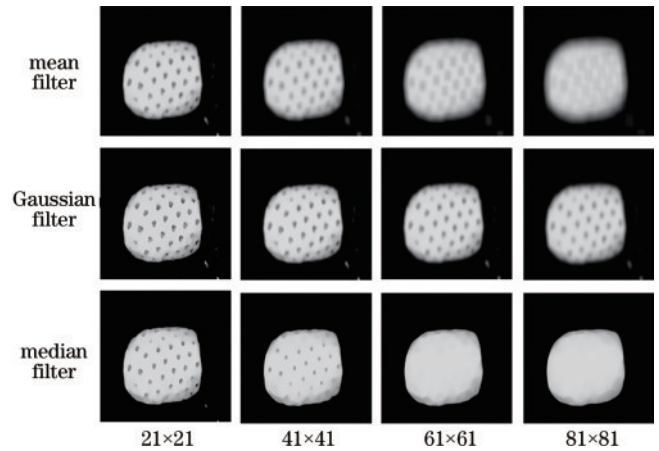


图 3 图像滤波

Fig 3 Image filtering

的卷积核, 高斯滤波对图像模糊程度最小, 中值滤波的核为 61×61 时就能将菠萝内刺特征全部滤除, 所以选择中值滤波来处理图像。滤波核越大, 计算量也就越大, 进一步细分确定中值滤波核的尺寸为 51×51 时, 能够满足使用需求。对图像 I_1 阴影消除处理后得到图像 I_3 如图 4 所示。

3.2.3 二值化图像

采用全局化阈值和自适应阈值两种方法对图像 I_3 进行处理, 全局化阈值二值化结果如图 5 所示, 自适应阈值二值化结果如图 6 所示。与图 5 相比, 图 6 保留了更多特征, 但干扰也较多, 部分内刺特征已经被干扰信息完全覆盖。所以采用全局化阈值对图像 I_3 进行二值化。

3.2.4 形态学处理

二值化后得到图像 I_4 如图 7(a) 所示, 菠萝内刺特

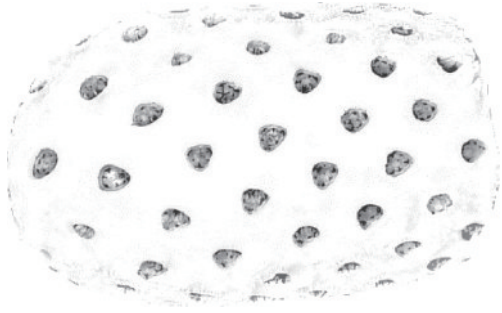


图 4 消除图像阴影

Fig. 4 Removing image shadows



图 5 全局化阈值

Fig. 5 Global thresholds



图 6 自适应阈值

Fig. 6 Adaptive thresholds

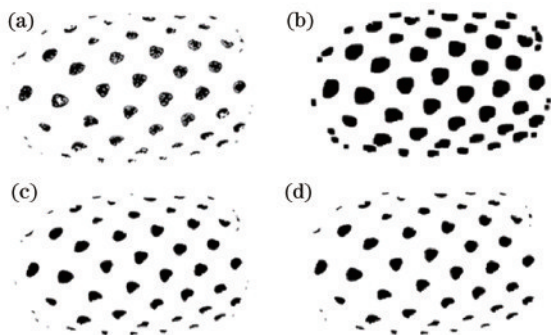


图 7 形态学处理结果。(a)二值图;(b)腐蚀;(c)膨胀;(d)闭运算
Fig. 7 Morphological processing results. (a) Binary graph; (b) corrosion; (c) expansion; (d) closed operation

征存在较多的孔洞、残缺以及菠萝边界像素残留。这些需要进一步处理修复。采用形态学图像处理方法,根据菠萝内刺特征在图像中的像素距离确定腐蚀核的

大小为 5×5 , 对图像 I_4 进行两次腐蚀处理, 结果如图 7(b) 所示。两次膨胀处理, 结果如图 7(c) 所示。此时内刺特征中的孔洞填满, 但冗余的边界像素仍然存在; 将卷积核的尺寸调整为 3×3 , 对图像进行一次闭运算将大部分多余边界像素去除^[9], 得到图像 I_5 如图 7(d) 所示。

3.3 内刺特征提取

3.3.1 连通域分析

连通区域分析是指将图像中的各个连通区域找出并标记。采用 Two-Pass 算法对二值图像连通区域分析^[10], 具体计算过程如下。

第一步, 邻域判断采用 4 邻域的方式, 遍历像素的顺序是从上到下, 从左到右, 初始 $f_{label} = 0$ 。像素标记规则为

- ① 若像素 $f(x, y) = 1$, 跳过进行下一个像素检测。
- ② 若像素 $f(x, y) = 0$, 检查 $f(x-1, y)$ 和 $f(x, y-1)$ 像素值是否都为 1, 若都为 1, 则 $f_{label} = f_{label} + 1$, 像素标号标记为 f_{label} ; 反之取该像素邻域中的最小 f_{label} 作为该像素的 f_{label} 。
- ③ 根据像素的 f_{label} 值对像素进行等价性分析。

第二步,

- ① 若像素 $f(x, y) = 1$, 则跳过进行下一个像素检测。
- ② 若像素 $f(x, y) = 0$, 用相等关系中最小的 f_{label} 替换当前像素的 f_{label} 。遍历完所有像素。具有相同 f_{label} 的像素就属于相同的连通区域, 为了能直观区分, 将不同的连通区域用不同颜色加以区分, 划分结果如图 8 所示。



图 8 连通区域划分结果

Fig. 8 Result of division of connected area

3.3.2 提取连通区域轮廓

区域轮廓是图像上连续的边界点连在一起组成的闭合曲线。选择一个连通域, 利用 Candy 算子对连通域进行边缘检测, 得到的边缘点就是连通域的轮廓^[11]。根据此方法提取出所有连通域的轮廓如图 9 所示。

3.3.3 轮廓特征

特征在图像中的面积可以用连通域像素的个数替代^[12], 特征面积 S_{area} 可表示为



图9 连通域轮廓

Fig. 9 Connected domain contour

$$S_{\text{area}} = \sum_{x=0}^{m-1} \sum_{y=0}^{n-1} f(x, y), \quad (5)$$

式中: m 为图像矩阵的行数; n 为图像矩阵的列数; $f(x, y)$ 为连通域中 (x, y) 处的像素值, (x, y) 为像素的行列坐标。

计算对应轮廓长度为 L 的圆面积 S_L , 轮廓圆度 η 可表示为

$$\eta = \frac{4\pi S_L}{L^2}, \quad (6)$$

式中: S_L 为轮廓的面积。 η 的范围为 $[0, 1]$, $\eta = 1$ 是圆的圆度, 圆度越小, 轮廓形状越不像圆^[13]。

通过多组图像测试, 将面积大于 200 且小于 2000 的轮廓保留, 剔除掉边界干扰点, 然后计算剩余轮廓的圆度, 再去掉圆度低于 0.5 的图形^[14], 剔除图像中位于菠萝边缘的内刺特征, 这些特征信息压缩比较大, 计算特征中心点时会引入较大误差。筛选后的结果如图 10 所示。



图10 处理结果

Fig. 10 Processing results

3.4 内刺中心点计算

采用最小外接矩形的中心来表示内刺在图像中的位置^[15]。首先, 利用特征轮廓计算轮廓的凸壳得到 n 个顶点, 这些顶点构成点集 P , 从点集中任选一个元素点作为 p_0 , 计算 p_0 到其他点的距离, 选择距离最小的点为 p_1 , 然后在剩余点中找到与 p_1 距离最近的点 p_2 , 重复该过程直到找到 p_n , 按照刚刚寻找排序标号^[16], 得到新的点集合 $\{p_0, p_1, \dots, p_n\}$, 计算 $p_i p_{i+1}$ 组成的直线与 x 轴正向的夹角 θ_i , θ_i 可表示为

$$\theta_i = \tan^{-1} \left(\frac{y_{i+1} - y_i}{x_{i+1} - x_i} \right), \quad (7)$$

$$\begin{bmatrix} x'_i \\ y'_i \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\sin \theta_i & 0 \\ \sin \theta_i & \cos \theta_i & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (8)$$

利用式(8)将点集合中的点绕原点旋转角度 θ_i , 得到新的点集 $\{p'_0, p'_1, \dots, p'_n\}$, 在新的点集中找到最大和最小横坐标和纵坐标, 构型为外接矩形, 并计算出外接矩形的面积和中心坐标 (x'_i, y'_i) , 然后再反向旋转角度 θ_i 得到外接矩形在原始图像中的中心点 (x_i, y_i) 。在所有外接矩形中筛选出面积最小的矩形, 即找到最小面积外接矩形对应的中心 (x, y) 。用最小外接矩形的内接椭圆将检测到的内刺圈出^[17]如图 11 所示。

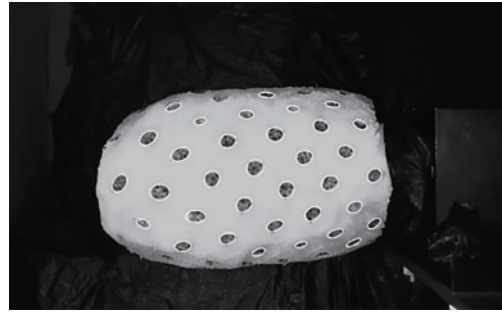


图11 检测结果

Fig. 11 Detection results

4 菠萝内刺空间定位

通过图像处理只能得到菠萝内刺在图像中的位置, 实际菠萝内刺去除时需要向设备提供内刺的三维坐标。因此, 需将图像中内刺的二维坐标转换成设备可以使用的空间坐标^[18]。利用菠萝外轮廓和图像内刺坐标计算内刺三维坐标值是菠萝内刺去除的关键。

4.1 坐标转换原理

将描述菠萝特征点之间相对位置的坐标系定义为菠萝坐标系; 描述菠萝上的点相对于设备位置的坐标系称为测量坐标系。为了方便菠萝坐标系与测量坐标系之间的转换, 测量坐标系也采用柱面坐标系^[19]。两个坐标系的关系如图 12 所示, 通过相机拍摄的图像获得内刺在 z 轴坐标 z_0 , 利用菠萝外轮廓数据计算出 z_0 截面数据点集 $\{p_1, p_2, \dots, p_n\}$ 构成集合 C_2 , 对 C_2 中的数据进行拟合得到数据函数 g 。已知光心 Q 的坐标为 $(l, 0)$, 内刺中心点与光心的连线与 x 轴正向的夹角为 γ ^[20]。当直线 l 的函数已知, l 与 g 联合求解, 就能得到内刺点 p 在测量坐标系中的坐标为 (x, α, z_0) , 通过主轴编码器获得当前菠萝坐标系相对于测量坐标系的旋转角度 β 。所以点 p 在菠萝坐标系中的坐标值为 $(x, \alpha + \beta, z_0)$ 。几何关系如图 13 所示。

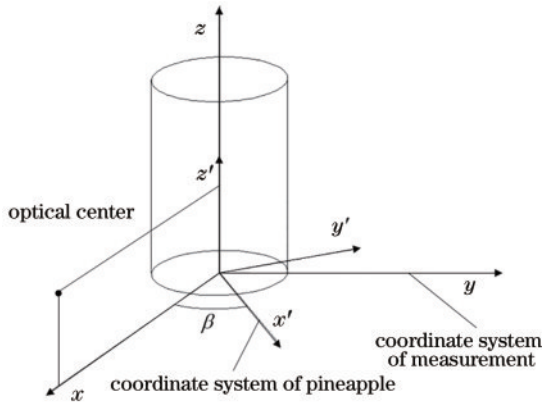


图 12 坐标系

Fig. 12 Coordinate system

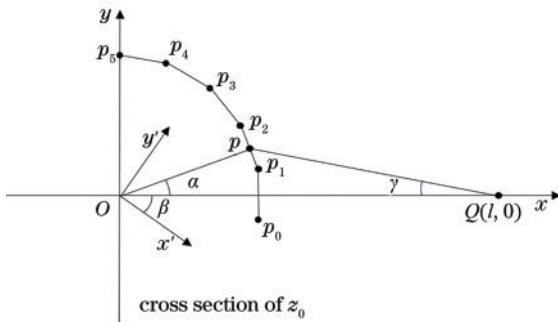


图 13 几何关系示意图

Fig. 13 Schematic diagram of geometric relations

4.2 坐标转换

4.2.1 角度 \$\gamma\$ 计算

现实世界中的物体在相机光传感器上的投影具有一定的几何关系如图 14 所示, 点 \$P'\$ 为外界点 \$P\$ 在相机光传感器的投影, \$f\$ 为镜头的焦距, \$m, n\$ 为光传感器在水平方向和竖直方向的尺寸, \$\gamma\$ 为点 \$P'\$ 与点 \$O'\$ 的连线在 \$xO'\$ 平面的投影与 \$OO'\$ 的夹角^[21]。

现在令内刺的像素坐标为 \$(x, y)\$, 光心 \$O\$ 的像素坐标为 \$(x_0, y_0)\$, 已知图像分辨率为 \$M \times N\$, 夹角 \$\gamma\$ 可

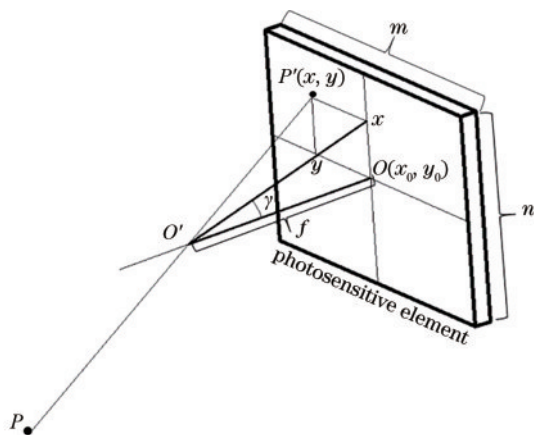


图 14 投影关系

Fig. 14 Projection relation

表示为

$$\gamma = \arctan \left[\frac{(x - x_0)n}{fN} \right]. \quad (9)$$

4.2.2 截平面数据获取

菠萝外轮廓数据构成数据集 \$C_0\$, \$C_0\$ 中的数据按照坐标 \$z\$ 的大小排列, 已知数据的螺距为 \$P_h\$, 间隔角度为 \$\theta\$。当截面高度为 \$z_0\$, 提取 \$[z_0 - P_h, z_0 + P_h]\$ 范围内的数据点形成新的数据集 \$C_1\$。\$C_1\$ 中的数据并不是都位于 \$z_0\$ 平面上, 需经过计算才能得到 \$z_0\$^[22]。如图 15 所示, 在 \$C_1\$ 找到具有相同角度的数据点 \$P_1(z_1, r_1)\$ 和 \$P_2(z_2, r_2)\$, 通过下式可以计算出 \$P_0(z_0, r_0)\$。采用此方法可得 \$z_0\$ 截面的数据集 \$C_2\$, 当 \$z_0 < P_h\$ 或 \$z_0 > h - P_h\$ 时, \$C_1\$ 的数据分别来自于 \$[z_0 + P_h, z_0 + 2P_h]\$ 或 \$[z_0 - 2P_h, z_0 - P_h]\$。

$$r_0 = \left(\frac{r_2 - r_1}{z_2 - z_1} \right) (z_0 - z_1) + r_1. \quad (10)$$

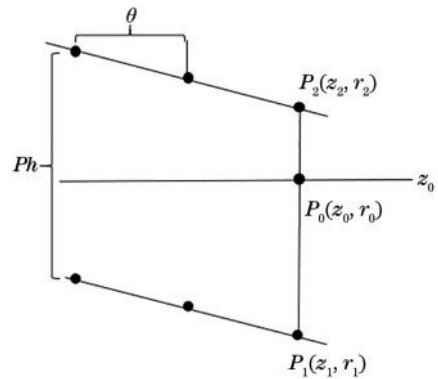


图 15 截面数据

Fig. 15 Sectional data

4.2.3 截平面数据筛选

光心与坐标原点在同一个平面内, \$\gamma\$ 的理论角度范围为 \$(-90^\circ, 90^\circ)\$, 当 \$\gamma\$ 大于 \$0\$ 时, 内刺位于 \$xy\$ 坐标系的第一象限; 当 \$\gamma\$ 小于 \$0\$ 时, 内刺位于第四象限, 根据 \$\gamma\$ 的正负剔除掉不相关的数据, 进而提高函数拟合速度和精度。首先, 将集合 \$C_2\$ 的坐标转换成测量坐标系下的坐标^[23]。然后, 判断 \$\gamma\$ 的正负, 当 \$\gamma\$ 为正时, 只保留第一象限的数据, 反之保留第二象限的数据, 被保留的数据构成新的集合 \$C_3\$。

4.2.4 截平面边缘函数

因为采样间隔角度 \$\theta\$ 和菠萝直径较小, 采用多段直线函数来拟合截面边界曲线, 这种方式具有误差小、方法简单、计算速度快等特点^[24]。设集合 \$C_3\$ 中有 \$n\$ 个元素, 将 \$C_3\$ 中的元素按照角度 \$\alpha\$ 的大小排序 \$\{p_0, p_1, \dots, p_{n-1}\}\$, 为了方便求解, 利用下式将极坐标数据转换成对应的直角坐标。

$$\begin{cases} x_i = r_i \cos \alpha_i \\ y_i = r_i \sin \alpha_i \end{cases}, \quad (11)$$

$$\begin{cases} k_i = \frac{y_{i+1} - y_i}{x_{i+1} - x_i}, \\ b_i = y_i - k_i x_i \end{cases} \quad (12)$$

$$y = \begin{cases} k_0 x + b_0, [x_0, x_1] \\ k_1 x + b_1, [x_1, x_2] \\ \vdots \\ k_{n-2} x + b_{n-2}, [x_{n-2}, x_{n-1}] \end{cases}, \quad (13)$$

式中： r_i 为点 p_i 距离坐标原点的距离； α_i 为过 p_i 和原点的直线与横坐标正向的夹角角度； x_i 为 p_i 坐标转换后的横坐标值； y_i 为 p_i 坐标转换后的纵坐标值； k_i 为过 p_i 点和 p_{i+1} 点直线的斜率； b_i 为过 p_i 点和 p_{i+1} 点直线的截距。

然后利用式(12)求解相邻元素的直线函数,最后利用式(13)将这些直线函数按照横向坐标区间顺序组合成截面边界的多段直线函数。

4.2.5 交点计算

已知过光心的直线 l 函数表达式为 $y = (x - l) \tan \gamma$, 因柱状对象在图像中存在信息压缩, 图像中位于柱面体边缘的特征会被压缩, 这就给检测结果带来误差, 所以这些边缘内刺的数据将会被剔除^[25]。所以不会出现直线与多段函数中直线平行的情况, 将 l 与多段函数中所有直联立求解, 可得 $n - 1$ 个交点。从这些交点中找到满足直线定义域的点, 这个点就是内刺在菠萝上的位置。此时的点为直角坐标, 需转换成极坐标, 该坐标是在测量坐标系下的坐标值, 需进一步地转换得到菠萝坐标系中的坐标^[26]。

4.2.6 坐标点筛选

已知柱面图像中柱面边缘存在信息压缩, 柱体表面特征越靠近柱体投影中心信息损失越少^[27], 测量计算时精度也就越高, 特征越靠近柱面图像的边缘, 信息压缩越严重, 检测误差会更大如图 16 所示。因此, 数据筛选的指标就是相同内刺特征在不同图片中与光心像素的距离, 保留距离相对小的坐标值^[28]。

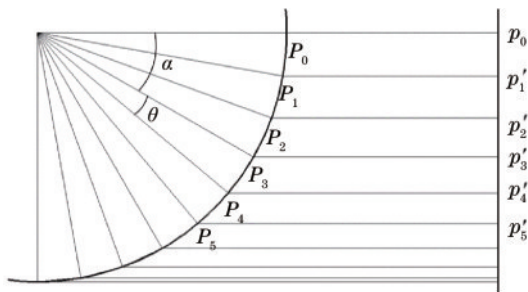


图 16 定长圆弧投影示意图

Fig. 16 Schematic diagram of constant length arc projection

5 实验验证

利用 Python 3.6 实现菠萝内刺检测算法和数据处理。程序运行条件: 操作系统为 Windows 10, CPU 为

Corei7-10750H, 内存为双通道 16 G, 显卡为 RTX2060 6 G, 运行环境为 PyCharm 2020. 1. 2。

5.1 菠萝内刺检测算法实验分析

随机采集 100 张不同角度下的菠萝图像, 取出其中 4 张如图 17 所示, 其中左上角图像的图号为 0, 从 0 号图开始沿顺时针方向, 图像图号依次为 1、2、3。检测结果如图 18、图 19 所示。采用所提方法和 Opencv 中简单斑点检测算法对 100 张图中的菠萝内刺进行检测^[27]。将 100 张图片分为 4 组, 每组 25 张, 统计每组的检出点数和正确点数, 并计算两种算法的准确率, 检测结果如表 1 所示。



图 17 原始图像

Fig. 17 Original image

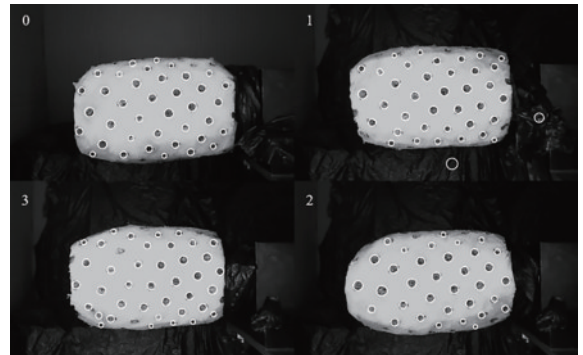


图 18 简单斑点检测算法检测结果

Fig. 18 Detection results of simple speckle detection algorithm



图 19 所提方法检测结果

Fig. 19 Detection results of the proposed method

表1 所提方法与简单斑点检测算法的检测结果对比
Tab.1 Comparison of detection results between proposed method and simple speckle detection algorithm

| Parameter | Simple speckle detection algorithm | Proposed method |
|------------------------------------------|------------------------------------|-----------------|
| 1 st accuracy /% | 94.74 | 97.36 |
| 2 nd accuracy /% | 94.44 | 99.14 |
| 3 rd accuracy /% | 94.12 | 97.06 |
| 4 th accuracy /% | 91.67 | 98.51 |
| Average speed / (frame·s ⁻¹) | 9.167 | 11.171 |

由表1可知,所提方法的平均检测速度及准确率均高于传统的简单斑点检测算法。由图18、图19可知,所提方法检出的内刺特征中剔除面积较小的边缘内刺,采用最小外接矩形中心作为内刺中心,特征点的质量更好,而简单斑点检测算法的内刺特征中存在包含较多的菠萝边缘点、中心区内刺漏检、内刺中心点偏差较大等问题。

5.2 定位检测精度分析

为了检测所提方法的定位精度,通过搭建实验平台,面阵相机的安装位置如图20所示,测量前先对菠萝进行定尺寸切削,同时测量菠萝的直径为90 mm,高度为18 cm,选取其中一组内刺使用游标卡尺进行测量,测得菠萝中相邻内刺之间的中心距离28.3 mm,内刺的直径为9.5 mm和7.3 mm,如图21所示。测量时将定尺寸切削后的菠萝固定安装在圆筒位置的卡盘上,如图20所示,通过步进电机带动菠萝旋转,使用面阵相机采集5张菠萝内刺的图像,并上传至计算机中,采用所提的图像处理算法获得图像中内刺的空间位置,这些位置信息构成数据集合,然后从数据集合中随机选取一个点,计算该点与附近一点的距离作为测量距离,用测量距离减去标准距离就得到距离差值,取距离差值的1/2作为该点的测量误差值。按相同的步骤得到该点与剩余相邻点的误差,最后求该点与相邻点误差值的平均数作为该点的实际误差^[28]。计算每张图

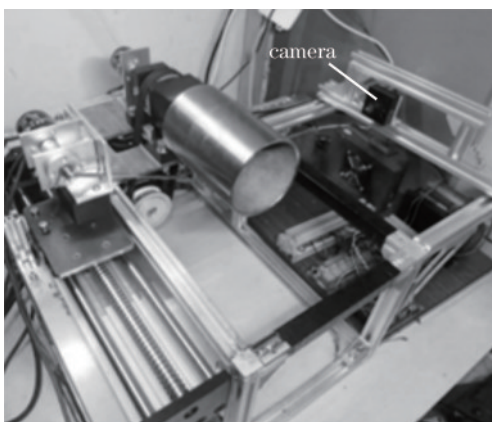


图20 实验平台

Fig.20 Experimental platform

中4个不相同点的测量误差。最大误差为0.63 mm,平均误差为0.33 mm,如表2所示。

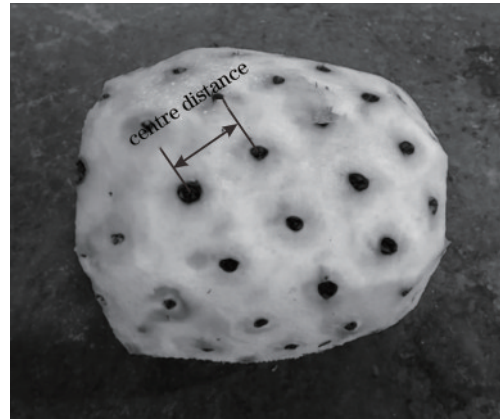


图21 菠萝图像

Fig.21 Pineapple image

表2 误差分析

Table 2 Error analysis

| Picture No. | Error 1 | Error 2 | Error 3 | Error 4 | Average error | Max error |
|-------------|---------|---------|---------|---------|---------------|-----------|
| a | 0.61 | 0.37 | 0.31 | 0.32 | | |
| b | 0.32 | 0.34 | 0.22 | 0.16 | | |
| c | 0.18 | 0.22 | 0.32 | 0.27 | 0.33 | 0.63 |
| d | 0.25 | 0.43 | 0.58 | 0.63 | | |
| e | 0.33 | 0.33 | 0.15 | 0.22 | | |

6 结 论

确定菠萝图像采集系统中相机、镜头、光源的选型和光照系统的设置。开发针对工业加工过程中菠萝内刺的检测算法,包括图像中干扰特征的剔除,感兴趣区域的分割以及内刺特征点的计算,利用内刺特征点坐标与菠萝外轮廓信息计算出菠萝内刺在菠萝坐标中的位置,从而实现菠萝内刺的精确定位。

对比实验表明:所提方法准确率以及平均检测速度明显高于传统的简单斑点检测算法,内刺的中心位置拟合精度较高。定位精度检测中,检测最大误差为0.63 mm,平均检测误差为0.33 mm,平均检测速度和精度都能够满足菠萝加工过程中内刺去除工序的需要。

所提方法针对工业流水线中定尺寸切削的菠萝内刺有着较高的平均检测速度和检测精度,且能够实现对菠萝内刺三维坐标的定位,为菠萝内刺的去除提供一定的理论基础,提高菠萝加工过程中果肉的利用率。

参 考 文 献

- [1] 邓春梅,李玉萍,梁伟红,等.我国菠萝产业发展现状及对策[J].山西农业科学,2018,46(6):1031-1034.
Deng C M, Li Y P, Liang W H, et al. Present situation and countermeasures of pineapple industry in China[J].

- Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2018, 46(6): 1031-1034.
- [2] 杜召来, 刘恩平, 刘海清, 等. 海南省菠萝产业发展现状、问题及对策研究[J]. 热带农业工程, 2015, 39(2): 33-39.
Du Z L, Liu E P, Liu H Q, et al. Current situation, issues and countermeasure of pineapple industry in Hainan [J]. Tropical Agricultural Engineering, 2015, 39(2): 33-39.
- [3] 张阳梅, 曾建生, 赵志平, 等. 菠萝种质资源果实主要数量性状的主成分分析[J]. 热带农业科技, 2016, 39(2): 10-13, 28.
Zhang Y M, Zeng J S, Zhao Z P, et al. Principal component analysis of main quantitative characters in pineapple germplasm[J]. Tropical Agricultural Science & Technology, 2016, 39(2): 10-13, 28.
- [4] 张寅, 朱桂熠, 施天俊, 等. 基于特征融合与注意力的遥感图像小目标检测[J]. 光学学报, 2022, 42(24): 2415001.
Zhang Y, Zhu G Y, Shi T J, et al. Small object detection in remote sensing images based on feature fusion and attention[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(24): 2415001.
- [5] 秦岭. 基于图像处理和深度学习的 PCB 图像缺陷检测[D]. 无锡: 江南大学, 2021.
Qin L. PCB image defect detection based on image processing and deep learning[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2021.
- [6] 冯波. 基于机器视觉的纸病诊断系统架构和光源优化策略研究[D]. 西安: 陕西科技大学, 2021.
Feng B. Research on system architecture and light source optimization strategy for paper defect diagnosis system based on machine vision[D]. Xi'an: Shaanxi University of Science & Technology, 2021.
- [7] 王政. 基于深度学习和信息融合的疲劳驾驶检测研究[D]. 芜湖: 安徽工程大学, 2021.
Wang Z. Driving fatigue detection based on deep learning and information fusion[D]. Wuhu: Anhui Polytechnic University, 2021.
- [8] 赵磊. 基于图像处理的贴片电阻缺陷检测方法研究与应用[D]. 南京: 南京邮电大学, 2013.
Zhao L. Research and application of defect detection method based on image processing chip fixed resistor[D]. Nanjing: Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2013.
- [9] Zhang L, Chen Q, Zuo C, et al. Real-time high dynamic range 3D measurement using fringe projection[J]. Optics Express, 2020, 28(17): 24363-24378.
- [10] 陈龙, 王文聪, 张峰峰, 等. 基于双目结构光的术中肝脏表面局部亮度饱和和分区投影[J]. 光学精密工程, 2021, 29(11): 2590-2602.
Chen L, Wang W C, Zhang F F, et al. Zonal projection based on binocular structured light for localized luminance saturation of intraoperative liver surface[J]. Optics and Precision Engineering, 2021, 29(11): 2590-2602.
- [11] Nayar S K, Nakagawa Y. Shape from focus[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1994, 16(8): 824-831.
- [12] Xiong Y, Shafer S A. Depth from focusing and defocusing[C]//Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, June 15-17, 1993, New York, NY, USA. New York: IEEE Press, 2002: 68-73.
- [13] Darell T, Wohn K. Depth from focus using a pyramid architecture[J]. Pattern Recognition Letters, 1990, 11(12): 787-796.
- [14] Ruel S, Luu T, Ancil M, et al. Target localization from 3D data for on-orbit autonomous rendezvous & docking [C]//2008 IEEE Aerospace Conference, March 1-8, 2008, Big Sky, MT, USA. New York: IEEE Press, 2008.
- [15] 李旭东, 崔磊, 赵慧洁, 等. 双振镜点扫描三维形貌测量系统[J]. 光学精密工程, 2010, 18(7): 1648-1653.
Li X D, Cui L, Zhao H J, et al. Three-dimensional shape measurement system based on dual oscillating mirrors with point scanning[J]. Optics and Precision Engineering, 2010, 18(7): 1648-1653.
- [16] Nayar S K, Nakagawa Y. Shape from focus[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1994, 16(8): 824-831.
- [17] 周渊, 孟祥群, 江登表, 等. 复杂干扰情况下的结构光条纹中心提取方法[J]. 中国激光, 2020, 47(12): 1204004.
Zhou Y, Meng X Q, Jiang D B, et al. Centerline extraction of structured light stripe under complex interference[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(12): 1204004.
- [18] 李双勋, 王展. 提高雷达测量精度的方位角与原点修正方法[J]. 光学学报, 2022, 42(4): 0412001.
Li S X, Wang Z. Azimuth and origin correction method for improving radar measurement accuracy[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(4): 0412001.
- [19] Yun J, Choi T S. Fast shape from focus using dynamic programming[J]. Proceedings of SPIE, 2000, 3958: 71-79.
- [20] Westoby M J, Brasington J, Glasser N F, et al. 'Structure-from-Motion': a high resolution, low-cost photogrammetric tool for geoscience applications[J]. Geomorphology, 2011, 179: 300-314.
- [21] Xu D F, Anguelov D, Jain A. PointFusion: deep sensor fusion for 3D bounding box estimation[C]//2018 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, June 18-23, 2018, Salt Lake City, UT, USA. New York: IEEE Press, 2018: 244-253.
- [22] Zhao X, Liu Z, Hu R L, et al. 3D object detection using scale invariant and feature reweighting networks[J]. Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence, 2019, 33(1): 9267-9274.
- [23] 李帅, 杜玉红. 基于改进 3RDP 算法的法线估计散乱点云轮廓提取[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(16): 1610016.
Li S, Du Y H. Boundary extraction of scattered point cloud with normal estimation based on improved 3RDP algorithm[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021,

- 58(16): 1610016.
- [24] Beltrán J, Guindel C, Moreno F M, et al. BirdNet: a 3D object detection framework from LiDAR information[C]//2018 21st International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC), November 4-7, 2018, Maui, HI, USA. New York: IEEE Press, 2018: 3517-3523.
- [25] Qi C R, Litany O, He K M, et al. Deep Hough voting for 3D object detection in point clouds[C]//2019 IEEE/CVF International Conference on Computer Vision (ICCV), October 27–November 2, 2019, Seoul, Republic of Korea. New York: IEEE Press, 2020: 9276-9285.
- [26] 卢伟, 邹明萱, 施浩楠, 等. 褐菇采摘的视觉识别-测量-定位一体化方法[J/OL]. 农业机械学报:1-11[2022-10-24]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1964.S.20220914.1758.020.html>.
- Lu W, Zhou M X, Shi H N, et al. An integrated visual recognition-measurement-localization approach for brown mushroom picking[J/OL]. Journal of Agricultural Machinery: 1-11[2022-10-24]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1964.S.20220914.1758.020.html>.
- [27] 王湘明, 孙建建, 伞宏力. 柱面展开在安全套表面缺陷检测中的应用[J]. 沈阳工业大学学报, 2022, 44(1): 79-83.
- Wang X M, Sun J J, San H L. Application of cylindrical expansion for surface defect detection of condoms[J]. Journal of Shenyang University of Technology, 2022, 44(1): 79-83.
- [28] 海潮, 赵凤霞, 孙烁. 基于Blob分析的红枣表面缺陷在线检测技术[J]. 食品与机械, 2018, 34(1): 126-129.
- Hai C, Zhao F X, Sun S. Research on online detection for jujube surface defects based on blob analysis[J]. Food & Machinery, 2018, 34(1): 126-129.