

万鹏,熊成新,郭畅,等.基于机器视觉的商品马铃薯质量与薯型分级方法[J].华中农业大学学报,2025,44(6):323-333.  
DOI:10.13300/j.cnki.hnlkxb.2025.06.032

## 基于机器视觉的商品马铃薯质量与薯型分级方法

万鹏<sup>1,2</sup>,熊成新<sup>1</sup>,郭畅<sup>1</sup>,喻亮<sup>1</sup>,吴晓龙<sup>1</sup>

1. 华中农业大学工学院,武汉 430070; 2. 农业农村部长江中下游农业装备重点实验室,武汉 430070

**摘要** 针对商品马铃薯混杂销售导致其商品价值降低,且人工分选费时费力,分级效率低下等问题,提出一种基于机器视觉的商品马铃薯质量与薯型分级方法。搭建了马铃薯图像采集装置采集马铃薯视频,从中等间隔截取马铃薯图像,对采集的马铃薯图像进行图像校正,再采用图像处理方法获取马铃薯二值化图像。根据马铃薯质量特征,对马铃薯二值化图像进行边缘检测,提取马铃薯轮廓坐标点并构建马铃薯三维模型,使用线性回归分析方法构建商品马铃薯体积预测模型,根据密度公式得到质量预测模型,实现商品马铃薯的质量分级。根据薯型特征,提取图像中马铃薯区域的最小外接矩形的长、宽、长宽比、马铃薯区域的面积、周长、圆形度、偏心率和凸度8个物理参数,并对其使用KMO检验与Bartlett检验判断主成分分析法的适用性,采用主成分分析法对物理参数矩阵进行降维,结合逻辑回归分析法,建立薯型分级预测模型,对商品马铃薯畸形分类检测;对大中小各40个的马铃薯样本进行质量分级试验,随机抽取50个的马铃薯样本进行薯型分级试验;体积预测模型分级正确率分别为95%、100%、95%;薯型分级预测模型分级正确率分别为92%和100%。研究表明,提出的机器视觉的商品马铃薯分级方法可用于商品马铃薯的质量与薯型的在线分级检测。

**关键词** 商品马铃薯;质量分级;薯型分级;主成分分析;在线检测

**中图分类号** TP391.4 **文献标识码** A **文章编号** 1000-2421(2025)06-0323-11

马铃薯作为我国第四大粮食作物<sup>[1-2]</sup>,近年来种植面积稳定在470万hm<sup>2</sup>左右,产量近9 000万t,占世界总产量的25%左右<sup>[3-4]</sup>。由于缺乏高效便捷的快速分级技术,商品马铃薯在流通过程中通常大小与好坏混杂,降低了商品薯的经济价值。目前,商品马铃薯分级主要分为人工分级和机械分级,但人工分级效率低、劳动强度大,且分级的结果容易受到主观影响<sup>[5]</sup>;以称质量为原理的机械分级流水线,虽分选速度快,但其功能单一,无法评估薯型规整度等关键形态学指标,且其机械结构在高速运转中易因碰撞导致薯块损伤,进而降低商品价值<sup>[6]</sup>。

基于机器视觉的分级算法主要可分为2类<sup>[7]</sup>。第一类是以卷积神经网络为代表的深度学习方法,其性能强大,但模型训练高度依赖大规模标注数据与高性能计算硬件,农业场景的部署成本高。第二类是结合传统图像处理与机器学习的方法,该方法通过显式提取形状、尺寸等预定义特征进行分类,模型轻量、计算复杂度小,对硬件和数据量的要求较低。根据商品马铃薯分级任务要求,传统机械学习

方法在满足精度的同时,更具经济性和实用性。

图像信息能够直观地反映马铃薯外部特征,利用机器视觉技术能够实现对马铃薯快速分级<sup>[8-12]</sup>。周竹等<sup>[13]</sup>提出了一种基于V型平面镜的马铃薯大小与薯型的分级方法,通过图像处理提取3幅图像的马铃薯外接矩形宽度,计算马铃薯的最小外接柱体体积实现对马铃薯的大小分级,通过对提取的马铃薯最长径外接矩形的宽高比与阈值比较实现薯型分级。孔彦龙等<sup>[14]</sup>根据提取的面积与周长参数,结合回归分析实现对马铃薯质量分级,根据外形特性,采用宽高比法实现对马铃薯形状分级。邓立苗等<sup>[15-16]</sup>采用近似椭圆法实现对马铃薯形状分级。郝敏等<sup>[17]</sup>采用逐步回归分析法从15个特征参数中筛选出2个参数构建质量模型,试验结果显示,质量分级平均准确率为98%。现有的马铃薯质量与薯型分级方法中,樊宏鹏等<sup>[18]</sup>通过Transformer模型设计了2个分级模型,实现了马铃薯薯型与大小分级,但该方法需海量标注数据和对高性能GPU有较强依赖,且训练与部署成本高昂。王红军等<sup>[19]</sup>将3幅图像的马铃薯

收稿日期:2025-07-22

基金项目:湖北省重点研发计划项目(2023BBB062);湖北省乡村振兴科技支撑项目(2022BBA150)

万鹏, E-mail: wanpeng09@mail.hzau.edu.cn

区域面积与几何特征参数结合多线性回归分析实现对马铃薯质量与形状分级,但分级对马铃薯摆放姿态高度依赖,无法满足实时分级的要求。综上,通过图像处理技术提取马铃薯几何特征并结合多元线性分析实现马铃薯形状与质量分级技术是研究热点,但构建的模型无法准确计算马铃薯的质量,且选择构建形状模型的特征参数缺乏显著性分析。

商品马铃薯指从田间收获后经简单清洗、可直接作为商品售卖的马铃薯。本研究以商品马铃薯为研究对象,选取质量、薯型等影响其商品性的典型评价指标,基于图像处理与三维重建技术,提出了一种基于机器视觉的商品马铃薯质量与薯型分级方法,旨在克服现有技术的局限性,实现对商品马铃薯质量和薯型的精准、自动化分级。

## 1 材料与方法

### 1.1 商品马铃薯图像的制备与预处理

1)商品马铃薯图像采集装置。商品马铃薯图像采集装置由铝型材框架、相机、光源、毛刷辊、电机、齿轮与链条组成,其中相机固定于铝型材框架横梁上,距离地面58 cm,型号为intel RealSense d435i,分辨率1 920像素×1 080像素;光源为工业环形(LED)光源,布置于相机周围;电机为60 W可调速电机,转速为0~1 400 r/min;毛刷辊圆周布置黑色尼龙材质的毛刷,且装置外部包裹一层内部为黑色的布料,构造黑色的拍摄背景(图1)。

商品马铃薯图像采集装置工作时,电机输出轴上的齿轮作为主动轮,通过链条同步带动2根毛刷辊一端的从动轮进行同向旋转,调整2根毛刷辊的间距与电机转速,使马铃薯能够随着毛刷辊的旋转在2根毛刷辊间转动,同时,计算机控制相机采集马铃薯样本转动状态的俯视视频传输回计算机进行保存。

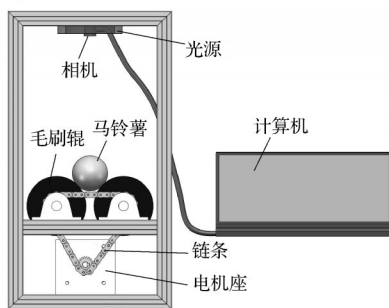


图1 商品马铃薯图像采集装置结构示意图

Fig.1 Schematic structure of potato image acquisition device

2)商品马铃薯视频的获取。本研究所用商品马铃薯样本皆来自武汉某种植基地,挑选不同大小的畸形马铃薯以及正常马铃薯共200个,用塑料网袋装好存放于阴凉处待检测。单个马铃薯的质量大小为45.5~670 g。

在采集商品马铃薯视频前,先采用Zhang<sup>[20]</sup>的方法对相机进行标定;采用电子秤(精度0.1 g)测量商品马铃薯样本的质量数据;采用排水法,用烧杯(50 mL)测量马铃薯的体积数据。在采集商品马铃薯视频过程中,将马铃薯样本编号以及马铃薯质量数据、体积数据、马铃薯视频储存路径等信息输入MySQL软件的数据库中进行数据储存。

3)商品马铃薯原始图像预处理。为了准确表征马铃薯样本的轮廓与薯型特征,从马铃薯样本旋转的视频中按照所需图像数量,等角度间隔地从中截取所需数量的马铃薯图像,并将属于同一个马铃薯的所有图像按照截取先后顺序构成1个马铃薯图像序列。在马铃薯视频录制过程中,马铃薯处于运动状态,截取的图像可能存在噪音,会影响后续的质量预测与薯型预测的精度,因此对图像采用5×5的中值滤波进行平滑处理以去除噪音;为消除复杂拍摄背景的影响,对图像进行灰度化处理,获取马铃薯的掩模图像,执行原始图像与掩模图像叠加操作,实现对马铃薯图像的背景去除。其中,对于掩模图像中存在的小黑点或者小白点,可以通过开运算或者闭运算高级形态学处理进行消除,处理后的马铃薯掩模图像如图2所示。

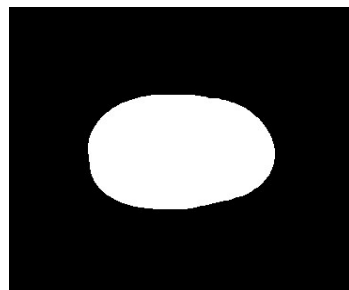


图2 马铃薯的掩模图像

Fig.2 Mask image of potato

4)商品马铃薯图像旋转校正。正常的商品马铃薯外形为椭球型,具有近似长短轴。在采集商品马铃薯视频过程中,马铃薯的理想位置应是马铃薯的长轴方向与毛刷辊轴线(水平线方向)平行。但是实际操作过程中,由于马铃薯是在毛刷辊的带动下动态旋转,马铃薯的长轴方向不一定与毛刷辊轴线平

行,也即马铃薯不一定会围绕平行于毛刷辊的长轴方向旋转,如图3所示。

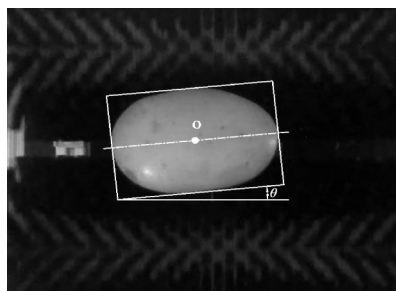


图3 马铃薯的偏转图像

Fig.3 Deflection image of potato

当马铃薯的长轴方向与水平线具有一定倾斜角度( $\theta$ )时,采集的马铃薯俯视图也会产生一定的夹角,不利于后续对于图像的分析处理,因此需对马铃薯图像进行旋转校正。

计算马铃薯最小外接矩形时,经过马铃薯质心 $O$ 且平行于马铃薯最小外接矩形长边的虚线(图3)为马铃薯的长轴方向,则与水平方向的夹角为 $\theta$ ,则 $\theta$ 即为马铃薯图像旋转校正的角度。本研究采用具有高定位精度与低错误率的canny边缘检测算法提取马铃薯边界<sup>[21]</sup>,获得马铃薯的边缘图像。使用OpenCV函数库中的findContours函数可从马铃薯边缘图像中获得马铃薯轮廓点,将轮廓点带入minAreaRect函数中获取马铃薯最小外接矩形的4个顶点坐标点,通过任意两点之间的三角函数关系即可得到夹角 $\theta$ 。按式(1)、(2)分别计算图像的旋转矩阵和旋转后的像素矩阵,得到旋转校正后的马铃薯图像,旋转校正后的马铃薯图像如图4所示。

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) \\ \sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$I'(x', y') = I(\cos(\theta)x' + \sin(\theta)y', -\sin(\theta)x' + \cos(\theta)y') \quad (2)$$

式(1)~(2)中, $I'(x', y')$ 为旋转后的图像像素值, $I(x, y)$ 为原图像像素值。

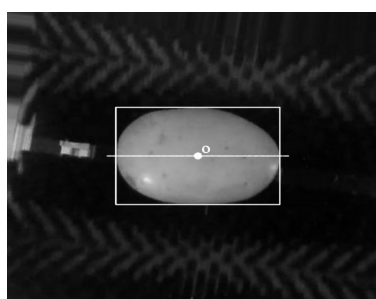
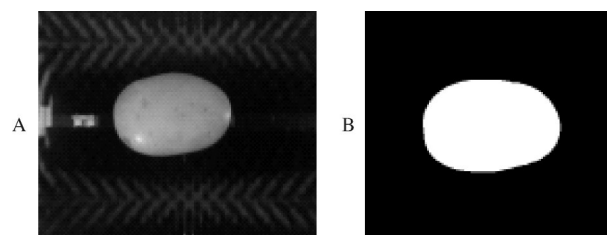


图4 校正后的马铃薯图像

Fig.4 Corrected potato image

5)校正后的商品马铃薯图像二值化。数字图像在计算机中通常以RGB格式进行储存,该种格式表示图像的信息会从红、绿、蓝3个通道进行储存<sup>[22]</sup>。每次对图像进行处理,都需对3个通道的数据进行计算,计算复杂度高。在对商品马铃薯的质量与薯型分级中,主要聚焦于马铃薯轮廓与形状,弱化马铃薯表面的纹理与亮暗特征,对于去除背景后的马铃薯图像,RGB格式的图像中3个通道蕴含所需的图像信息与单通道中蕴含所需的信息基本一致,故为简化处理流程,降低处理难度,将图像二值化,提高图像处理效率。二值化图像如图5B所示。



A:源图像 Source image; B:二值化图像 Binarized image.

图5 处理前后的马铃薯图像

Fig.5 Comparison of potato images after image processing

## 1.2 基于三维重构的商品马铃薯质量分级

1)马铃薯质量分级标准。根据NY/T 1066—2006《马铃薯等级规格》马铃薯等级规格,可将马铃薯按照单薯质量划分为大、中、小3级,其中小型马铃薯单薯质量小于100 g,中型马铃薯单薯质量介于100~300 g,大型马铃薯单薯质量大于300 g。

2)商品马铃薯三维重构与体积计算。计算机视觉无法直接识别马铃薯的质量,但可以通过计算马铃薯的体积间接计算得到马铃薯的质量。从旋转校正后的马铃薯二值化图像中提取马铃薯图像,进而提取马铃薯图像轮廓点,以马铃薯图像的质心为坐标原点,矩形长度方向为 $x$ 轴,宽度方向为 $y$ 轴,建立该平面的坐标系,马铃薯轮廓点坐标图如图6所示。

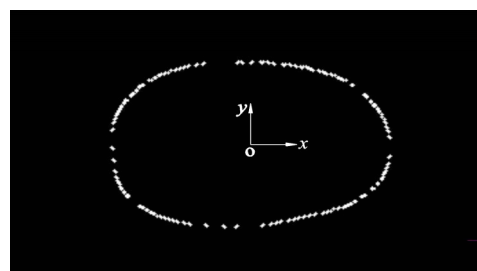
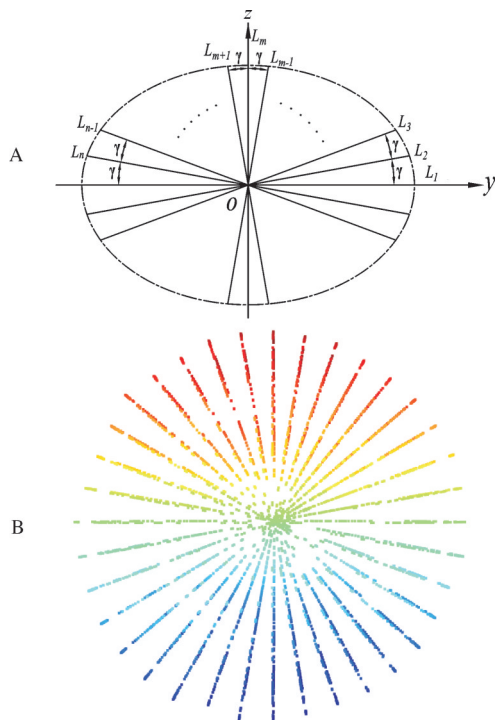


图6 马铃薯轮廓点坐标图

Fig.6 Coordinate map of potato contour points



对于属于同一个马铃薯的所有轮廓点坐标图,将每个图中的坐标系重合,且由于 $x$ 轴(旋转轴)方向上左右两端点之间的距离相等,因此在轴向视图中以旋转轴为圆心,按照马铃薯图像序列中的顺序将马铃薯轮廓点图像旋转,旋转的角度为图像序列中该图像与第1张马铃薯图像之间的夹角,如图7A所示,其中, $L_n$ 为第 $n$ 张马铃薯图像, $\gamma$ 为相邻2张马铃薯图像间的角度,图7B为 $\gamma=10^\circ$ 时计算机生成的实际马铃薯三维轮廓轴向视图。将每张马铃薯图像轮廓坐标点与角度代入式(3)计算得到马铃薯三维轮廓坐标点位置,得到马铃薯三维轮廓模型。



A:理论图像 Theoretical image; B:实际生成的图像 Actual images generated.

图7 马铃薯三维轮廓轴向视图

Fig.7 Axial view of potato three-bit profile

$$\begin{aligned} x_1 &= x \cos(n\gamma) \\ y_1 &= y \\ z_1 &= x \sin(n\gamma) \end{aligned} \quad (3)$$

式(3)中, $x, y$ 为图像轮廓的二维坐标点的横纵坐标, $x_1, y_1, z_1$ 为三维轮廓坐标点的空间坐标, $\gamma$ 为等角度间隔截取马铃薯图像时的角度, $n$ 为间隔数。

三维空间的平面坐标系与第一幅马铃薯图像的二维坐标系重合,将所有马铃薯轮廓坐标点导入开源点云库Open3D形成点云集<sup>[23-24]</sup>,则马铃薯三维轮廓模型如图8所示。

为了使生成的马铃薯三维模型更加接近真实的

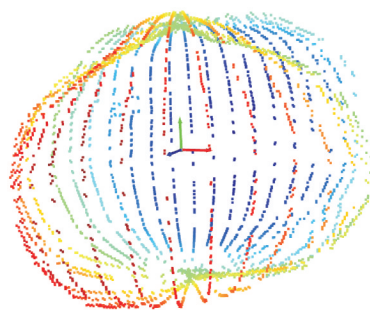
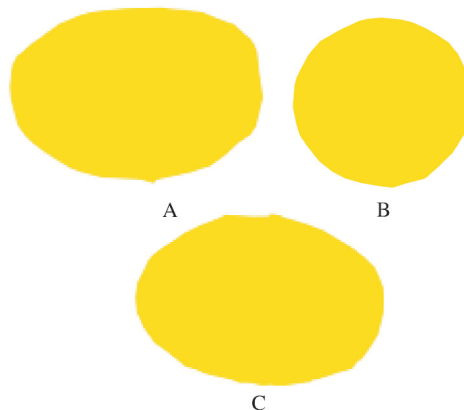


图8 马铃薯三维轮廓模型

Fig.8 Three-dimensional contour model of potato

马铃薯外形,去掉马铃薯轮廓点中与点云集距离较远的轮廓点,使用三维凸包法即可生成马铃薯三维体积模型<sup>[25]</sup>,重构的马铃薯三维模型如图9所示。



A:主视图 Main view; B:左视图 Left view; C:俯视图 Top view.

图9 马铃薯三维模型三视图

Fig.9 Three views of the potato 3D model

三维凸包生成的马铃薯三维模型由三角网格构成,这类三角网格是由一系列三角形面片拼接而成的多面体结构,其中每个三角形面片均由3个顶点来定义。以像素为单位计算该马铃薯的体积,其体积计算公式为:

$$V_{\text{模}} = \frac{1}{6} \sum_{i=1}^n (\vec{v}_1 \odot (\vec{v}_2 \otimes \vec{v}_3)) \quad (4)$$

式(4)中, $V_{\text{模}}$ 为三维重构的马铃薯体积,单位为像素点, $\vec{v}_1, \vec{v}_2, \vec{v}_3$ 是以一个点为公共顶点与三角形面片的3个顶点构成的3个二维向量。

3)商品马铃薯质量计算。采用线性回归方法构建马铃薯三维模型体积与实测体积的定量关联模型,其核心依据为三维重构模型体积与排水法实测体积存在显著线性相关性。该方法通过最小二乘法可高效拟合二者的稳定定量关系,且模型参数物理意义明确,可有效避免非线性方法易产生的过拟合及解释性不足等问题。具体操作中,以三维重构技术获取的模型体积为自变量,结合排水法实测体积

数据,经最小二乘法拟合建立数学模型,旨在实现马铃薯数字模型体积与真实体积的精准映射,体积模型如式(5)所示,根据式(6)即可得出商品马铃薯的质量。

$$V_{\text{实}}=aV_{\text{模}}+b \tag{5}$$

$$m=\rho V_{\text{实}} \tag{6}$$

式(5)~(6)中, $V_{\text{实}}$ 为使用排水法测出的马铃薯体积,mL; $a$ 与 $b$ 为体积模型的权重系数; $m$ 为马铃薯的质量,g; $\rho$ 为马铃薯的密度,g/cm<sup>3</sup>。

1.3 基于主成分分析的商品马铃薯薯型分级

1)商品马铃薯特征参数的选取。商品马铃薯的薯型分为畸形马铃薯与非畸形马铃薯2种,2种典型的马铃薯俯视图如图10所示,为了提高识别效率,本研究主要识别目标为畸形马铃薯。

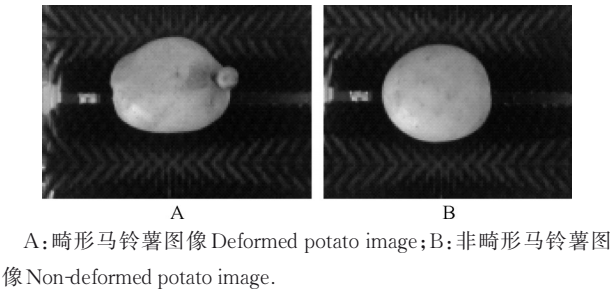


图10 2种薯型的马铃薯图像

Fig.10 Images of potatoes of two potato type

为获得与马铃薯薯型相关的几何形状尺寸,从去除背景后的马铃薯二值化图像中提取出与马铃薯形状相关的图像特征参数。根据马铃薯的轮廓图像,提取马铃薯最小外接矩形的长、宽、长宽比、马铃薯边缘轮廓周长、马铃薯区域面积、偏心率、凸度、圆形度8个特征作为决定薯型的参数,如图11所示。提取的8个特征参数值如表1所示。

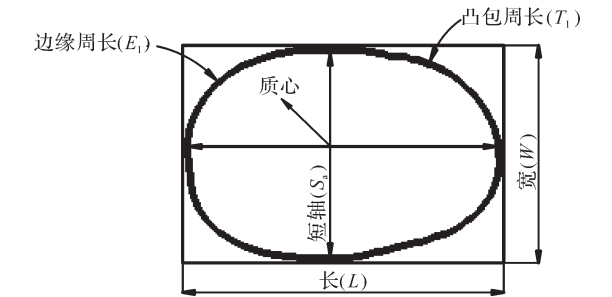


图11 马铃薯几何特征参数

Fig.11 Geometric characterization parameters of potato

图10中,2种薯型的马铃薯的几何特征参数值如表2所示。

商品马铃薯的特征参数能够对马铃薯薯型进行表征,为了准确识别正常马铃薯与畸形马铃薯,本研

表1 马铃薯薯型的特征值参数

Table 1 Characteristic value parameters of potato type

特征参数 Parameterization	描述 Descriptive
长(L) Length	最小外接矩形的长度
宽(W) Width	最小外接矩形的宽度
长宽比(I) Length and width ratio	$I=\frac{L}{W}$
边缘轮廓周长(E <sub>1</sub> ) Edge contour perimeter	二值化边缘轮廓像素点个数
区域面积(A) Area	二值化图像区域内像素点个数
偏心率(E) Eccentricity	$E=\sqrt{1-(\frac{L_a}{S_a})^2}$
凸度(T <sub>D</sub> ) Convexity	$T_D=\frac{E_1}{T_1}$
圆形度(Y <sub>XD</sub> ) Circularity	$Y_{XD}=\frac{4\pi A}{L_a^2}$

注: $T_1$ 为凸包周长, $L_a$ 为长轴, $S_a$ 为短轴。Note:  $T_1$  is the circumference of the convex packet,  $L_a$  is the long axis and  $S_a$  is the short axis.

表2 2种薯型的马铃薯的几何特征参数值

Table 2 Values of geometrical characterization parameters of potatoes of two potato types

参数 Parameter	畸形 Deformities	非畸形 Non-deformed
长/pixel Length	262.00	208.00
宽/pixel Width	199.00	165.00
长宽比 Length and width ratio	1.31	1.26
边缘周长/pixel Edge contour perimeter	785.80	612.20
区域面积/pixel Area	39 646.50	27 788.0
偏心率/pixel Eccentricity	733.11	600.82
凸度 Convexity	0.65	0.61
圆形度 Circularity	0.81	0.93

注:pixel为像素,表示其单位。Note:Pixel is a pixel and indicates its unit.

究采用主成分分析法对特征参数进行评价。

2)主成分分析法。主成分分析法(principal component analysis,PCA)是一种经典的降维技术,其核心思想是通过正交变换将一组可能存在相关性的高维变量转换成一组线性不相关的低维变量(主成分)<sup>[25]</sup>,旨在通过线性变换将原始高维数据转换到低维空间,提升计算速率,同时尽量保留数据的主要特征。其中,对于从马铃薯图像中提取的8个参数,马铃薯的最小外接矩形的长、宽、马铃薯的偏心率、马铃薯边缘轮廓周长与马铃薯的面积皆以像素点为单位,长宽比、凸度、圆形度为无量纲参数,故需先对其进行标准化,统一量纲。

3)商品马铃薯的薯型分级模型构建。采用主成

分分析法对经过标准化处理后的8个马铃薯特征参数进行降维处理:首先通过计算参数间的相关系数矩阵,分析特征变量的内在关联性;随后基于特征值大于1的准则与累计贡献率 $\geq 80\%$ 的阈值,综合确定保留的主成分数量,并结合主成分载荷矩阵构建主成分函数(即各主成分与原始特征参数的线性组合表达式)。

以筛选出的主成分作为输入变量,以1或0为输出变量(马铃薯畸形取值为1,非畸形取值为0),构建薯型分级模型并通过设计商品马铃薯薯型分级试验对模型进行验证。

2 结果与分析

2.1 马铃薯的质量分级方法

按照马铃薯等级规格表,使用电子秤对马铃薯划分等级,试验样本由110个马铃薯组成。对马铃薯图像进行图像处理,提取马铃薯轮廓点,构建马铃薯三维模型,计算三维模型的体积,其中由线性拟合三维模型的体积参数与实际测量的体积参数生成的数学模型图如图12所示,其模型如式(7)所示,该模型的决定系数 $R^2$ 为0.977,具有很高的相关性。

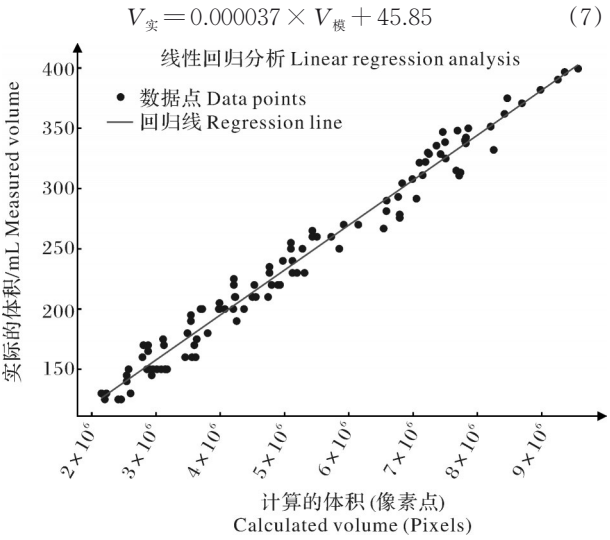


图12 体积数学模型图

Fig.12 Volume mathematical modeling diagram

其中,样本密度为110个马铃薯密度的平均值,其值为 $1.10 \text{ g/cm}^3$ ,符合商品马铃薯密度 $1.0 \sim 1.2 \text{ g/cm}^3$ 范围<sup>[26]</sup>。则商品马铃薯质量分级模型如式(8)所示:

$$m = 1.10 \times 0.0000373V_{模} + 45.85$$
 (8)

使用建立的质量分级模型对大、中、小型马铃薯各40个样本进行分级试验,结果表明,40个小型马铃薯

薯中将2个马铃薯识别为中型马铃薯,识别准确率为95%;40个中型马铃薯全部正确识别,识别准确率为100%;40个大型马铃薯中将2个识别为中型马铃薯,识别准确率为95%。

由试验可知,本质量分级模型对中型马铃薯的识别准确率最高,达100%;但在小型、大型马铃薯的识别中存在误差,部分小型、大型马铃薯被误判为中型,分析可能这些误判样本的质量与分级阈值过于接近。尽管存在上述误差,但模型整体分级准确率仍达95%以上,能够满足实际分级生产的需求。

2.2 商品马铃薯薯型分级方法

1) 马铃薯薯型各种指标相关性检验、KMO和Bartlett球形度检验。对马铃薯薯型各项指标(图像中马铃薯最小外接矩形的长、宽、长宽比、凸度、圆形度、偏心率、周长和面积)采用描述性统计分析,得出相关性热图,如图13所示。

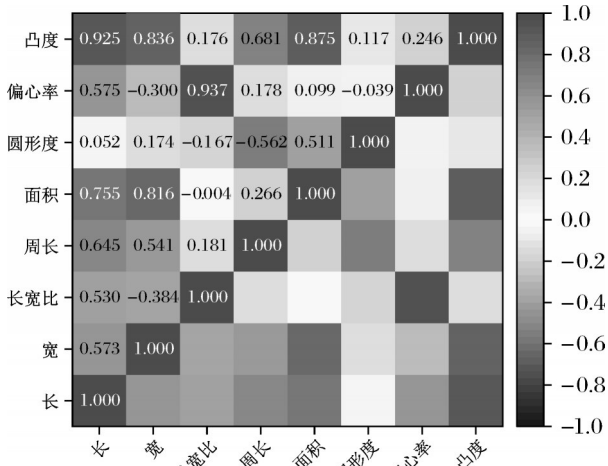


图13 马铃薯薯型指标间的相关性分析图

Fig.13 Correlation analysis between potato type indicators

从图13可看出,马铃薯的8个指标间存在不同程度的相关性,其中马铃薯图像的最小外接矩形的长与宽、长宽比、图像中马铃薯的周长、面积、偏心率、凸度呈极显著正相关,与圆形度呈正相关;最小外接矩形的宽与周长、面积、凸度呈正相关,相关系数分别为0.54、0.81和0.83,与长宽比、偏心率呈负相关,相关系数分别为-0.38和-0.31;长宽比与周长、凸度、偏心率呈正相关,与面积、圆形度呈负相关,相关系数分别为-0.004和-0.16;周长与面积、偏心率、凸度呈正相关,与圆形度呈负相关,相关系数为-0.562;面积与圆形度、偏心率、凸度都呈正相关;圆形度与偏心率呈负相关,相关系数为-0.039,与凸度



呈正相关,相关系数为0.12;偏心率与凸度呈正相关,相关系数为0.25。

KMO 检验是用于比较变量间相关系数和偏相关系数的指标,若KMO 值小于0.6,表明这些变量不适合进行主成分分析;Bartlett 球形度检验是用于检验变量之间协方差矩阵是否为单位矩阵(球形)的指标,若其值小于0.05,适合主成分分析<sup>[27-28]</sup>。经过KMO 和 Bartlett 球形度检验,得出KMO 值大于0.6,且 Bartlett 球形度检验的概率小于0.01,进一步说明马铃薯薯型参数各指标间存在一定的相关性,适合采用主成分分析方法来评价马铃薯的形状。

2)主成分分析与模型验证。从采集的样本中随机抽取100个样本,从薯型分级的角度,使用人工分级的方法将样本划分为畸形与非畸形2大类,并采用随机抽取方法将样品分为训练集与校验集样本2类,其中,50个畸形样本中分为40个训练集样本、10个校验集样本,50个非畸形样本中分为40个训练集样本、10个校验集样本。

人工进行马铃薯分选时,主要观察马铃薯形状是否规整,若观察到马铃薯的顶部或侧面长出哑铃状、瘤状凸起,则为畸形马铃薯,否则为非畸形马铃薯。根据马铃薯薯型分类的特点,类型的判定与马铃薯图像中是否存在畸形部位相关,提取马铃薯的物理参数数据,使用主成分分析法对其进行处理。其中,主成分的特征值与贡献率是选择主成分的主要依据,本研究选择累计贡献率大于90%作为挑选依据<sup>[29-30]</sup>。以训练样本(40个畸形样本+40个非畸形样本)的数据为例,得到各个的初始特征值与贡献率,如表3所示。

由表3可知,前3个主成分的贡献率分别为48.960%、29.564%、19.333%,累计贡献率大于

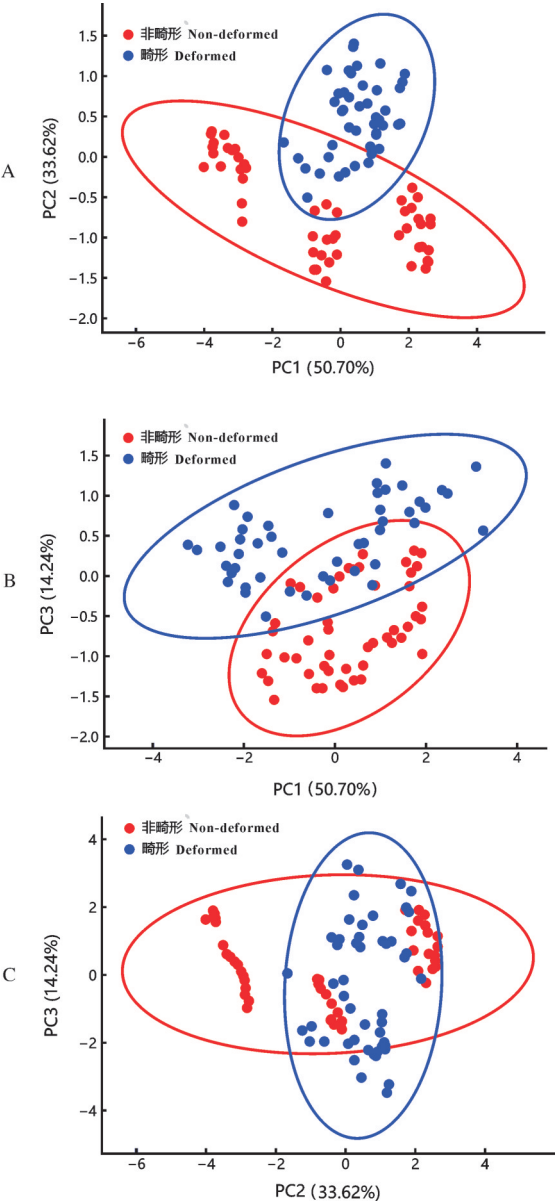
表3 马铃薯薯型参数指标的初始特征值与贡献率

Table 3 Initial eigenvalues and contribution of potato type parameter indicators in potato

主成分 Principal component	初始特征值 Initial eigenvalue	贡献率/% Contribution rate	累计贡献率/% Cumulative contribution
1	3.917	48.960	48.960
2	2.365	29.564	78.524
3	1.547	19.333	97.858
4	0.105	1.136	99.173
5	0.051	0.639	99.812
6	0.010	0.121	99.933
7	0.003	0.036	99.969
8	0.002	0.031	100.000

95%,因此前3个主成分可以代表原来8个指标所包含的绝大部分信息。

将训练样本的物理参数数据进行主成分分析,其结果如图14所示。从图14可知,畸形样本与非畸形样本在第一、第二主成分分析图与第一、第三主成分分析图中虽有重叠部分但较小,但在第二、第三主成分分析图中,重叠部分较大,说明马铃薯图像特征数据在第一主成分方向上的投影分级效果明显,在



A: 第一、第二主成分分析 First and second principal component analysis plot; B: 第一、第三主成分分析 First third principal component analysis plot; C: 第二、第三主成分分析 Second and third principal component analysis plot.

图14 马铃薯薯型分级主成分分析(PCA)图

Fig.14 Principal component analysis of potato potato type grading

第二、第三主成分分析方向上的投影分级效果不是很好,可能是因为第二、第三主成分都聚焦于抓取更细分、关联性强且区分力弱的特征,因此样本投影后重叠区域大,后续在构建分选模型时可适当减小第二、第三主成分的权重比例。

为提高计算效率,以主成分中每个指标对应的特征向量为权重构建主成分函数表达式。

$$Y_1 = -0.485X_1 - 0.390X_2 - 0.143X_3 - 0.346X_4 - 0.431X_5 - 0.050X_6 - 0.179X_7 - 0.501X_8 \quad (9)$$

$$Y_2 = -1.66X_1 + 0.396X_2 - 0.599X_3 - 0.105X_4 + 0.232X_5 + 0.270X_6 - 0.561X_7 + 0.070X_8 \quad (10)$$

$$Y_3 = -0.059X_1 + 0.137X_2 - 0.178X_3 + 0.549X_4 - 0.279X_5 - 0.709X_6 - 0.252X_7 + 0.024X_8 \quad (11)$$

式(9)~(11)中: $Y_1$ 、 $Y_2$ 、 $Y_3$ 分别为相应的主成分得分, $X_1$ 、 $X_2$ 、 $X_3$ 、 $X_4$ 、 $X_5$ 、 $X_6$ 、 $X_7$ 、 $X_8$ 分别为图像中马铃薯最小外接矩形的长、宽、长宽比、周长、面积、圆弧度、偏心率、凸度。

为实现对马铃薯薯型的分类,将畸形样本的标签设置为1,非畸形样本标签设置为0,并将训练样本的8个指标数据按照上述主成分函数表达式转换成3个主成分得分,采用逻辑回归方法得到畸形样本概率模型如式(12),使用该概率模型对薯型分级的50个随机样本进行分级试验,其中以0.5概率值为阈值,概率值大于0.5为畸形样本,概率值小于0.5为非畸形样本,试验结果显示,逻辑回归模型对畸形与非畸形马铃薯的分选正确率分别为92%与100%,说明该逻辑回归分选模型是可行的。

$$P(y=1) = (1 + \exp(224.12 + 0.18Y_1 - 0.61Y_2 - 0.80Y_3))^{-1} \quad (12)$$

式(12)中, $P(y=1)$ 为畸形样本的概率。

### 2.3 单颗马铃薯处理耗时分析

为评估模型在实际应用中的计算性能,并探讨其在线分级的可行性,对处理单个马铃薯样本的全流程进行了详细的耗时分解。所有性能测试均在同一硬件平台上完成,具体配置为:编程环境是Python 3.9.12以及OpenCV 4.8.0。试验全程未使用GPU进行加速。为提高试验结果的有效性,随机抽取20个马铃薯进行分级试验,每个步骤平均耗时如表4所示。

由表4可知,单个马铃薯分级耗时为0.532 s,分析效率约113个/min,若每个马铃薯平均质量为200 g,分级效率约1.3 t/h,优于徒鸿杨<sup>[31]</sup>设计的马铃薯外部缺陷去除系统的1 t/h的分级效率,满足在线分级要求。

图像处理包括视频帧的截取,马铃薯图像旋转

表4 单薯分级各阶段平均耗时

Table 4 Mean duration of individual stages in the single sweet potato grading procedure s

	图像处理 Image processing	质量分级 Quality grading		薯型分级 Potato shape grading	
		3D重建 3D recon- struction	模型推断 Model inference	特征提取 Feature extraction	模型 推断 Model inference
时间 Time	0.335	0.185	0.001	0.010	0.001
总时长 Total time			0.532		

校正和马铃薯图像的二值化操作,图像处理耗时占总时长的63%,可能是因为每次操作需要频繁的向计算机写入与删除每次操作处理后的马铃薯图像数据,增加处理时间;马铃薯三维重建包括马铃薯二维轮廓点的提取,三维轮廓的计算与模型的建立,质量分级所耗时间为0.186 s,占总分级时间的35%,满足在线分级;薯型分级所耗时间最少,为0.011 s,占总时长的2%,推测是程序能够直接从图像处理后的马铃薯二值化图像中提取薯型相关的特征参数,无需复杂的中间运算。

## 3 讨 论

本研究通过图像采集装置采集马铃薯的视频,从视频中等角度间隔地截取图像,对截取的图像使用图像处理去除背景并提取校正后的马铃薯图像轮廓坐标点,根据三角函数关系将马铃薯图像二维轮廓坐标点转换成马铃薯三维轮廓坐标点,并使用三维凸包法完成三维模型的构建,计算模型的体积得到马铃薯三维模型体积参数,通过线性回归分析,建立了三维模型与实际马铃薯之间的体积模型,其决定系数为0.977,表明重构马铃薯三维模型并计算得到的体积参数是可行的,最后通过密度公式得到马铃薯质量。试验结果表明,商品马铃薯质量分选准确率分别为95%、100%、95%,表明该方法在实际应用中具有显著的潜力,能够有效地提升分选效率与精度。在畸形马铃薯分级方面,本研究提取校正后的马铃薯图像的8个物理参数,采用主成分分析方法对其相关性进行了分析,分析显示前3个主成分变量至少解释了所有特征数据所包含的95%信息,并构建了每个主成分的函数表达式。通过逻辑回归分析,以3个主成分变量作为输入建立了畸形马铃薯的



概率模型,试验表明,畸形与非畸形马铃薯的分选正确率分别为92%、100%,这证明了所提取的物理参数及其整合后的主成分,能够有效捕捉导致马铃薯形态异常的关键信息,为实现自动化、高精度的畸形马铃薯识别提供了可靠的解决方案。分级准确率是评价马铃薯分级效果好坏的关键指标,但本研究所用样本较少,且生成的模型无法完全显示马铃薯表面的复杂凹陷细节,导致分级准确率较低,在后续的研究中应扩大样本数量,且在保证分级速度的情况下选择更优的三维模型生成算法,以提高马铃薯分级准确率。

## 参考文献 References

- [1] 庞泽,田国奎,王海艳,等.我国马铃薯产业发展现状及展望[J].中国瓜菜,2023,36(7):148-154.PANG Z, TIAN G K, WANG H Y, et al. Present situation and prospect of potato industry in China[J]. China cucurbits and vegetables, 2023, 36(7):148-154(in Chinese with English abstract).
- [2] 刘姚佳.马铃薯主粮化战略对我国耕地保留量问题的思考[J].陕西农业科学,2017,63(1):83-86.LIU Y J. Thoughts on the problem of cultivated land reserve in China by potato staple food strategy[J]. Shaanxi journal of agricultural sciences, 2017, 63(1):83-86(in Chinese with English abstract).
- [3] 罗其友,高明杰,张烁,等.中国马铃薯产业国际比较分析[J].中国农业资源与区划,2021,42(7):1-8. LUO Q Y, GAO M J, ZHANG S, et al. Comparative analysis on potato industry between China and other countries[J]. Chinese journal of agricultural resources and regional planning, 2021, 42(7):1-8(in Chinese with English abstract).
- [4] 罗其友,伦闰琪,高明杰,等.2021—2025年我国马铃薯产业高质量发展战略路径[J].中国农业资源与区划,2022,43(3):37-45. LUO Q Y, LUN R Q, GAO M J, et al. Strategy path of high-quality development of potato industry in china during from 2021 to 2025[J]. Chinese journal of agricultural resources and regional planning, 2022, 43(3):37-45(in Chinese with English abstract).
- [5] 姜宏,于永波,章翔峰,等.马铃薯外部品质分级方法综述[J].科学技术与工程,2022,22(14):5519-5527. JIANG H, YU Y B, ZHANG X F, et al. Potato external quality grading methods: a review[J]. Science technology and engineering, 2022, 22(14):5519-5527(in Chinese with English abstract).
- [6] 李卫,赵文杰,朱恒旭,等.基于DEM-MBD的变螺距式马铃薯分级装置设计与试验[J].农业机械学报,2025,56(7):94-104. LI W, ZHAO W J, ZHU H X, et al. Design and experiment of variable pitch potato grading devices based on DEM-MBD coupling[J]. Transactions of the CSAM, 2025, 56(7):94-104(in Chinese with English abstract).
- [7] 方少甫,吴全,李昱婷.机器视觉技术在农产品外观品质检测的研究进展[J].现代食品,2025(12):204-208. FANG S F, WU T, LI Y T. Research progress of machine vision technology in the inspection of appearance quality of agricultural products[J]. Modern food, 2025(12):204-208(in Chinese with English abstract).
- [8] 彭彦昆,孙晨,刘乐,等.苹果外部缺陷全表面在线检测分选装置研发[J].农业工程学报,2022,38(23):266-275. PENG Y K, SUN C, LIU L, et al. Development of full-surface online detection and sorting device for external defects of apples[J]. Transactions of the CSAE, 2022, 38(23):266-275(in Chinese with English abstract).
- [9] 刘云玲,张天雨,姜明,等.基于机器视觉的葡萄品质无损检测方法研究进展[J].农业机械学报,2022,53(S1):299-308. LIU Y L, ZHANG T Y, JIANG M, et al. Review on non-destructive detection methods of grape quality based on machine vision[J]. Transactions of the CSAM, 2022, 53(S1):299-308(in Chinese with English abstract).
- [10] 孙宝霞,汤林越,何志良,等.基于机器视觉的采后荔枝表皮微损伤实时检测[J].农业机械学报,2016,47(7):35-41. SUN B X, TANG L Y, HE Z L, et al. Real-time detection of micro-damage on peel of postharvest litchi based on machine vision[J]. Transactions of the CSAM, 2016, 47(7):35-41(in Chinese with English abstract).
- [11] 杨广辉,李红岭,张华,等.马铃薯品质无损检测技术的研究进展[J].粮油食品科技,2024,32(6):161-169. YANG G H, LI H L, ZHANG H, et al. Research progress on non-destructive detection techniques for potatoes quality[J]. Science and technology of cereals, oils and foods, 2024, 32(6):161-169(in Chinese with English abstract).
- [12] 薛亚军.马铃薯分级技术研究现状与展望[J].新疆农机化,2024(3):54-57. XUE Y J. Research status and prospect of potato grading technology[J]. Xinjiang agricultural mechanization, 2024(3):54-57(in Chinese with English abstract).
- [13] 周竹,黄懿,李小昱,等.基于机器视觉的马铃薯自动分级方法[J].农业工程学报,2012,28(7):178-183. ZHOU Z, HUANG Y, LI X Y, et al. Automatic detecting and grading method of potatoes based on machine vision[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(7):178-183(in Chinese with English abstract).
- [14] 孔彦龙,高晓阳,李红玲,等.基于机器视觉的马铃薯质量和形状分选方法[J].农业工程学报,2012,28(17):143-148. KONG Y L, GAO X Y, LI H L, et al. Potato grading method of mass and shapes based on machine vision[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(17):143-148(in Chinese with English abstract).
- [15] 邓立苗,杜宏伟,徐艳,等.基于机器视觉的马铃薯智能分选方法与实现[J].中国农机化学报,2015,36(5):145-150. DENG L M, DU H W, XU Y, et al. Implementation of intelligent potato grading method based on computer vision[J]. Journal of Chinese agricultural mechanization, 2015, 36(5):145-

- 150(in Chinese with English abstract).
- [16] 邓立苗,韩仲志,徐艳,等.基于机器视觉的马铃薯智能分级系统[J].食品与机械,2014,30(5):144-146. DENG L M, HAN Z Z, XU Y, et al. Intelligent potato grading system based on computer vision[J]. Food & machinery, 2014, 30(5): 144-146(in Chinese with English abstract).
- [17] 郝敏,麻硕士.基于机器视觉的马铃薯单薯质量检测技术研究[J].农机化研究,2009,31(9):61-63. HAO M, MA S S. Study on potato weight detection technology based on computer vision theory[J]. Journal of agricultural mechanization research, 2009, 31(9): 61-63(in Chinese with English abstract).
- [18] 樊宏鹏,于鹏飞,杨森.基于视觉Transformer的马铃薯薯形与大小自动分级[J].食品与机械,2024,40(7):111-116. FAN H P, YU P F, YANG S. Automatic grading of potato shape and size based on visual Transformer[J]. Food & machinery, 2024, 40(7): 111-116(in Chinese with English abstract).
- [19] 王红军,熊俊涛,黎邹邹,等.基于机器视觉图像特征参数的马铃薯质量和形状分级方法[J].农业工程学报,2016,32(8):272-277. WANG H J, XIONG J T, LI Z Z, et al. Potato grading method of weight and shape based on imaging characteristics parameters in machine vision system[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(8): 272-277(in Chinese with English abstract).
- [20] ZHANG Z. A flexible new technique for camera calibration[J]. IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence, 2000, 22(11): 1330-1334.
- [21] 郭志彪,段为.基于OpenCV的边缘检测技术研究[J].现代计算机(专业版),2017,23(15):29-32. GUO Z B, DUAN W. Research on edge detection based on OpenCV[J]. Modern computer, 2017, 23(15): 29-32(in Chinese with English abstract).
- [22] 党满意,孟庆魁,谷芳,等.基于机器视觉的马铃薯晚疫病快速识别[J].农业工程学报,2020,36(2):193-200. DANG M Y, MENG Q K, GU F, et al. Rapid recognition of potato late blight based on machine vision[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(2): 193-200(in Chinese with English abstract).
- [23] 吴昊,李成斌,陈彦良,等.基于双目立体匹配的三维重建系统研究[J].现代计算机,2024(13):78-81. WU H, LI C B, CHEN Y L, et al. Research on 3D reconstruction system based on binocular stereo matching[J]. Modern computer, 2024(13): 78-81(in Chinese with English abstract).
- [24] 李宏星,刘玉春.基于三维激光点云的树冠体积计算方法研究[J].城市勘测,2022(5):149-153. LI H X, LIU Y C. Study on calculation methods for tree crown volume based on 3D laser point cloud[J]. Urban geotechnical investigation & surveying, 2022(5): 149-153(in Chinese with English abstract).
- [25] 负小杰,马岁洋,胡训鹏,等.黄花角蒿种子质量分级标准研究[J].种子,2024,43(10):128-134. YUN X J, MA S Y, HU X P, et al. Research on the quality classification standard of *Incarvillea sinensis* var. *przewalskii* seeds[J]. Seed, 2024, 43(10): 128-134(in Chinese with English abstract).
- [26] 吴海风.马铃薯种薯智能分级与芽眼识别方法研究[D].大庆:黑龙江八一农垦大学,2025. WU H F. Study on intelligent grading and bud eye identification of potato seed potato[D]. Daqing: Heilongjiang Bayi Agricultural University, 2025(in Chinese with English abstract).
- [27] 张鹏超,张雯,黄益丹,等.甘蓝型油菜苗期耐酸性综合评价及耐酸种质筛选[J].华中农业大学学报,2023,42(6):164-174. ZHANG P C, ZHANG W, HUANG Y D, et al. Comprehensive evaluation of acid-tolerance and screening of acid-tolerant germplasm in *Brassica napus* at seedling stage[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2023, 42(6): 164-174(in Chinese with English abstract).
- [28] WANG S Q, LI Y, LIN Z Y, et al. Differences between constant and intermittent drying in surf clam: dynamics of water mobility and distribution study[J]. Drying technology, 2018, 36(11): 1273-1283.
- [29] 陈兴华,夏雨昕,李家鑫,等.杂交玉米苗期耐铝毒的多元综合评价及指标筛选[J].华中农业大学学报,2025,44(5):50-59. CHEN X H, XIA Y X, LI J X, et al. Comprehensive multivariate evaluation and screening of indicators for aluminum toxicity tolerance in hybrid maize seedlings[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2025, 44(5): 50-59(in Chinese with English abstract).
- [30] 明润廷,那立苹,万方,等.蚯蚓粪酸土改良剂对酸性土壤酸碱性、肥力及上海青生长的影响评价[J].华中农业大学学报,2025,44(4):58-67. MING R T, NA L P, WAN F, et al. Effects of vermicompost-based acid soil conditioners on acidity-alkalinity and fertility in acidic soil, and growth of Shanghaiqing[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2025, 44(4): 58-67(in Chinese with English abstract).
- [31] 徒鸿杨.马铃薯缺陷智能化在线去除系统设计[D].镇江:江苏大学,2021. TU H Y. Design of an intelligent online system for potato defects removal[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2021(in Chinese with English abstract).

## A machine vision-based method for grading quality and type of commercial potatoes

WAN Peng<sup>1,2</sup>, XIONG Chengxin<sup>1</sup>, GUO Chang<sup>1</sup>, YU Liang<sup>1</sup>, WU Xiaolong<sup>1</sup>

1. College of Engineering, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China;

2. Key Laboratory of Agricultural Equipment for the Middle and Lower Reaches of the Yangtze River, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Wuhan 430070, China

**Abstract** A machine vision-based method for grading the quality and type of commercial potatoes was proposed to solve the problems of lowering the commodity value of commercial potatoes due to their mixed sales, time-consuming and laborious manual sorting, and low efficiency of grading. A potato image acquisition device was built to collect videos of potato, intercepting images of potato at equal intervals. The images of potato collected were corrected, and then image processing methods were used to obtain binarized images of potato. Edge detection was conducted on the binarized image of potato based on the quality characteristics of potato. Potato contour coordinate points were extracted and a three-dimensional model of potato was constructed. The volume prediction model of commercial potatoes was constructed with linear regression analysis, and the quality prediction model was obtained according to the density formula to grade the quality of commercial potatoes. Eight physical parameters including the length, width, aspect ratio, area, perimeter, roundness, eccentricity and convexity of the smallest outer rectangle of the potato area in the image were extracted based on the characteristics of potato type. The applicability of the principal component analysis (PCA) was judged with the KMO test and the Bartlett's test. PCA was used to downsize the matrix of the physical parameters. A prediction model for grading the type of potato was established by combining with the logistic regression analysis method to grade and detect deformities in commercial potatoes. An experiment of grading quality was conducted on 40 samples of potato with different sizes. 50 samples of potato were randomly selected for grading the type of commercial potato. The results showed that the accuracy of grading with the volume prediction model was 95%, 100%, and 95%, respectively. The accuracy of grading the type of commercial potato with prediction model for grading the type of commercial potato was 92% and 100%, respectively. It is indicated that the machine vision-based method for grading commercial potato proposed can be used for online detection of grading the quality and type of commercial potatoes.

**Keywords** commercial potatoes; grading quality; grading the shape of potato; principal component analysis (PCA); online detection

(责任编辑:陆文昌)