doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2024.S1.037

基于轮廓整形单元的原料肉3D可视化成像系统研究

卜令平[1,2]　高国伟[1]　乔　真[3,4]　田惠鑫[3,4]　胡敬芳[1,5]　张春晖[2,4]
胡小佳[2,4]　艾　鑫[2]　李　侠[2,4]　魏文松[2,3]
（1. 北京信息科技大学北京市传感器重点实验室，北京 100101；
2. 中国农业科学院农产品加工研究所农业农村部农产品加工综合性重点实验室，北京 100193；
3. 农业农村部农产品产地处理装备重点实验室，杭州 310058；
4. 淄博数字农业农村研究院，淄博 255035；5. 北京信息科技大学现代测控技术教育部重点实验室，北京 100192）

摘要：针对3D激光扫描实现不规则原料肉轮廓成像时存在扫描轮廓不完整、部分信息缺失、体积估测精度低等问题，根据原料肉物性学特性，本文设计了一种基于轮廓整形单元的3D可视化成像系统，实现不规则原料肉的形态调整，以优化不规则原料肉的成像性能。阐述了原料肉轮廓整形单元的工作原理，设计了样品驱动传输单元、扫描外触发控制单元、可实现轮廓整形的成像检测平台等硬件模块，确定了整形单元中铰链螺栓旋转方向、电机旋转圈数和原料肉轮廓目标整形角度之间的关系。基于Halcon平台和C#语言编写了轮廓整形优化原料肉成像性能的3D可视化软件，利用点云处理模型重建算法和灰度膨胀（Gray dilation）孔洞补偿算法，实现不规则原料肉轮廓整形前后信息采集、数据分析及体积估测准确度对比。最后选用120块猪肉（后腿、里脊）在冷鲜和麻冻状态下验证整形单元对原料肉轮廓成像的优化性能。结果表明，与传输方向呈90°、180°、270°、360°时肉块扫描后成像精度均不小于90%，变异系数不大于3%。冷鲜肉和麻冻肉最佳整形角度范围分别为30°~50°和40°~60°，体积估测准确率从90%分别提高至94%和97%以上。整形后其轮廓形态可维持时间均大于6 s，孔洞高度最大压缩比均小于0.77。研究证明，不规则原料肉经过轮廓整形单元后可有效提高成像性能，为后续基于轮廓成像实现不规则原料肉定量分切技术研发提供支持。

关键词：肉品识别；3D可视化；轮廓整形；激光扫描；点云处理；体积估测
中图分类号：TS251.3　　**文献标识码：**A　　**文章编号：**1000-1298(2024)S1-0346-10

Design and Experimental Verification of 3D Visual Imaging System Based on Contour Shaping Unit

BU Lingping[1,2]　GAO Guowei[1]　QIAO Zhen[3,4]　TIAN Huixin[3,4]　HU Jingfang[1,5]　ZHANG Chunhui[2,4]
HU Xiaojia[2,4]　AI Xin[2]　LI Xia[2,4]　WEI Wensong[2,3]
(1. *Beijing Key Laboratory of Sensors, Beijing Information Science and Technology University, Beijing* 100101, *China*
2. *Key Laboratory of Agricultural Product Processing, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Institute of Food Science and Technology, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing* 100193, *China*
3. *Key Laboratory of on Site Processing Equipment for Agricultural Products, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Institute of Food Science and Technology, Hangzhou* 310058, *China*
4. *Zibo Institute for Digital Agriculture and Rural Research, Zibo* 255035, *China*
5. *Key Laboratory of Modern Measurement and Control Technology, Ministry of Education, Beijing Information Science and Technology University, Beijing* 100192, *China*)

Abstract: Aiming at 3D laser scanning to achieve irregular raw meat contour imaging, there are problems such as incomplete scanning contours, missing data, and low volume estimation accuracy. In light of these limitations, a 3D visual imaging system was presented based on the contour shaping unit. This system was designed to address the morphological characteristics of irregular raw meat, with the aim of optimizing the imaging performance of irregular raw meat. The operational methodology of the contour shaping apparatus was delineated, and the essential hardware modules,

收稿日期：2024－08－21　修回日期：2024－09－24
基金项目：国家重点研发计划项目(2022YFD2100502)、中国农业科学院农产品加工研究所创新工程院所重点任务项目(CAAS-ASTIP-G2022-IFST-08)、淄博数字农业农村研究院创新团队项目和农业农村部农产品产地处理装备重点实验室开放课题(2016NYZD2305)
作者简介：卜令平(2000—)，男，硕士生，主要从事检测技术与自动化装置研究，E-mail: bulingping_7@163.com
通信作者：魏文松(1989—)，男，副研究员，主要从事农产品光学信息感知与智能加工装备创制研究，E-mail: weiwensong8@163.com

including the sample driving and transmission unit, scanning external trigger control unit, and imaging detection platform. Additionally, the relationship between the rotational orientation of the hinge bolt in the shaping apparatus, the number of motor rotations, and the desired contour angle of the raw material meat was determined. A 3D visualization software was ultimately developed on the Halcon platform by utilizing the C# language. The point cloud processing model reconstruction algorithm and gray dilation hole compensation algorithm were employed to facilitate the acquisition of information, analysis of data, and comparison of volume estimation accuracy before and after contour shaping of irregular raw meat. This was done in order to validate contour shaping to optimize the imaging performance of meat. A total of 120 pieces of chilled and frozen pork (hind shank and loin) was employed to substantiate the enhanced functionality of the shaping unit for the imaging of raw meat contours. The results demonstrated that the post-scanning imaging accuracies of the meat pieces at 90°, 180°, 270° and 360° relative to the transmission direction were greater than 90%, and the coefficients of variation were no more than 3%. The optimal angle for shaping ranged from 30° to 50° for chilled meat and from 40° to 60° for frozen meat. The accuracy of volume estimation was improved from 90% to over 94%, and 97%, respectively. Following the shaping process, the contour of chilled and frozen meat morphology can be maintained for over 6 s, with a maximum compression ratio of hole height below 0.77. The research result demonstrated that the imaging performance of irregular raw meat can be significantly enhanced through the application of a contour shaping unit. This finding provided a valuable foundation for subsequent research and development efforts aimed at advancing quantitative slitting technology based on contour imaging for irregular raw meat.

Key words: meat recognition; 3D visualization; contour shaping; laser scanning; point cloud processing; volume estimation

0　引言

我国是肉类生产和消费大国，2023年全国肉类产量达9.761×10^7 t，年增长4.6%[1]。中式肉类菜肴以其丰富的口味和多样的烹饪技艺受到广泛欢迎，但传统肉类处理方式常常面临着效率低、损耗大等问题。特别是在分切环节，人工处理效率低下，容易导致肉类的形状和质量不均[2-5]。所以实现肉类体积精准估测是指导定量分切的关键。

三维激光扫描技术利用时间飞行法(TOF)和相位差法等激光测距方法，通过发射漫反射激光束并接收反射信号来测量物体与扫描仪之间的距离[6-7]。三维激光扫描作为一种高精度、高采样率和高稳定性的轮廓扫描与体积估测方法，已被广泛应用于农产品目标轮廓识别领域[5,8-13]。国内相关肉类3D轮廓成像和可视化系统多集中在水产品[14-15]上，对于畜肉则在胴体分割识别定位方面关注较多。王树才等[16]采用3D激光扫描仪结合Kinect传感器设计了一套羊肉分割位置轮廓信息识别系统，实现了羊胴体/骨架关键分割部位的信息提取及分割路径规划。但其采用固定位置式扫描，会出现部分区域信息的缺失，影响成像效果。济南好为尔公司[17]研制了一款集成轮廓扫描成像技术的肉块定量分切设备，对肉块定量分切误差约2%，但设备中的扫描测量系统依赖国外进口。为避免出现此类问题，LIU等[18]基于激光传感器结合3D点云数据及自适应精英遗传算法，实现了定点猪腹部的2 mm高精度切割路径规划。BOOGAARD等[19]在此基础上利用PointNet++深度神经网络进行训练，在弯曲和直立植物中应用该方法后误差明显降低，但此类算法在原料肉中适用性差。并且AZARMDEL等[20]成功开发了鳟鱼精准分切识别与定位系统，准确率达到100%。但与鳟鱼相比，原料肉的形状不规则性尤为突出。前人在提升扫描成像性能方面，主要集中于鱼类、胴体分割等领域的算法优化和增加扫描仪数量[21-22]，然而对不规则原料肉的成像优化鲜有研究。

因此，本文设计一种原料肉轮廓整形单元，以减少扫描过程中不规则原料肉区域信息的缺失。同时，根据不同肉类的特点设置相应的整形角度，以实现更准确的体积估算。基于三维激光扫描仪，设计包含原料肉轮廓整形单元在内的3D可视化成像系统以期优化不规则肉的成像性能。并选取2种部位猪肉为研究对象，结合点云信息验证整形单元对不同形态、不同状态原料肉的体积估测。通过探究去骨猪肉整形后回弹时间对轮廓扫描精度的影响，完成3D可视化成像系统对不规则原料肉成像稳定性和体积估测准确度的测试，以期为后续肉品智能化定量分切装置的研发提供技术支持。

1　原料肉轮廓整形3D可视化成像系统硬件设计

1.1　整机结构

为了获取高精度肉品轮廓数据，设计了原料肉轮

廓整形3D可视化成像系统，硬件结构图如图1所示，主要由样品驱动传输单元、角度可调的轮廓整形单元、肉品成像检测平台、肉块扫描外触发控制单元及上位机等组成。整形单元根据肉品物性参数对待测肉品进行预处理，传输至光电检测器位置；之后PLC触发3D激光扫描仪开始扫描肉品，并实时上传数据至上位机。根据肉块点云数据，采用阈值分割算法提取并分离肉块孔洞，利用灰度膨胀完成图像孔洞填充，最后利用深度转点云算法将深度图像转为3D点云轮廓比计算待测肉块体积。

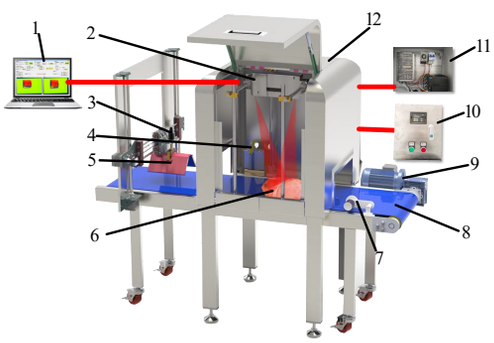


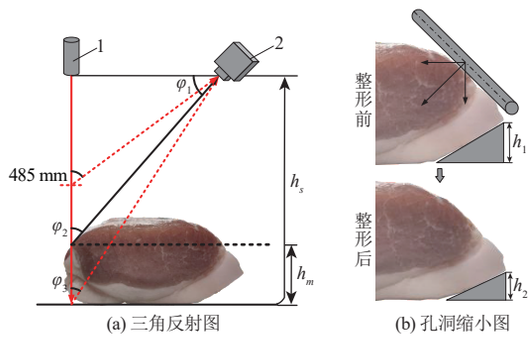
图1 原料肉轮廓整形3D可视化成像系统整体硬件结构图

Fig. 1 Overall hardware structure diagram of raw material meat contouring 3D visualization imaging system

1. 上位机 2. 三维激光扫描仪 3. 整形电机 4. 光电传感器 5. 整形单元 6. 原料肉 7. 旋转编码器 8. 传送带 9. 三相调速电机 10. 变频调速器 11. 控制电气柜 12. 检测暗箱

1.2 轮廓整形优化成像原理

相比之前研究[14-19]中的3D激光扫描成像系统，本研究的肉块轮廓整形单元对成像效果起主要作用。线激光扫描仪采用三角反射原理，如图2a所示，设接收光线与相机所在面水平方向上夹角为φ_1，光源投影建立的照射面与被照物体横切面形成的夹角为φ_2，对不规则肉块扫描时，因肉块坡度过陡或光源照射不完整等易造成成像失真，即$\varphi_1+\varphi_2<90°$。通过对坡度较高的肉块进行整形，整形后孔洞高度明显小于整形前高度，这旨在提高原料肉孔洞高度压缩比，从而增强相机对光线的接收面积，提高扫描成像的精度（图2b）。



(a) 三角反射图 (b) 孔洞缩小图

图2 轮廓整形优化成像原理图

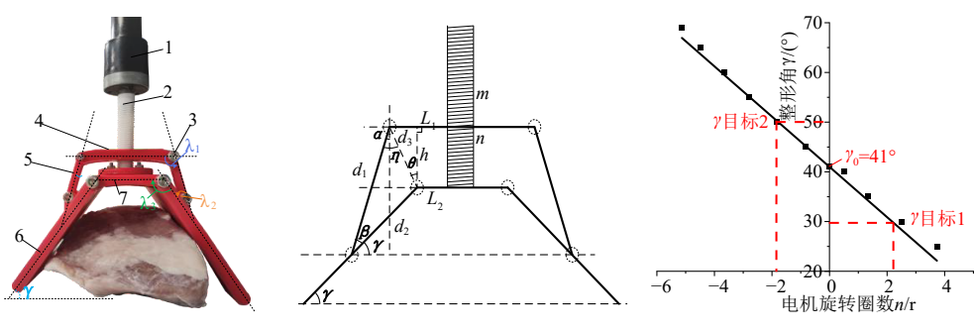
Fig. 2 Contour shaping optimized imaging schematics

1. 线激光发射源 2. 接收相机

1.3 原料肉轮廓整形单元结构及参数设计

1.3.1 整形单元结构

根据肉类物性学特性，设计整形角度范围。本文设计的肉品整形单元主要由整形电机、螺杆、移动螺纹副、连杆、整形压板、连接架等部件组成，具体结构如图3a所示。当整形电机驱动螺杆逆时针旋转时，移动螺纹副与连杆之间夹角λ_1变大，连杆与整形压板之间夹角λ_2和整形压板与连接架之间夹角λ_3处铰链螺栓向内旋转，λ_2与λ_3角度变小，整形角γ增大；当整形电机驱动螺杆顺时针旋转时，与逆时针情况均相反。



(a) 整形单元实物图 (b) 整形角度分析图 (c) 整形单元旋转角度图

图3 轮廓整形单元

Fig. 3 Contour shaping unit

1. 整形电机 2. 螺杆 3. 铰链螺栓 4. 移动螺纹副 5. 连杆 6. 整形压板 7. 连接架

1.3.2 整形单元核心模块控制参数确定

对整形单元进一步分析（图3b），各参数之间关系式为

$$d_3^2=\left(\frac{L_2-L_3}{2}\right)^2+h^2 \tag{1}$$

$$\begin{cases} d_3^2=L_1^2+d_2^2-2L_1d_2\cos\beta \\ d_2^2=L_1^2+d_3^2-2L_1d_3\cos\eta \end{cases} \tag{2}$$

$$\tan\theta=\frac{L_2-L_3}{2h} \tag{3}$$

式中 L_1——连杆长度

L_2——移动螺纹副长度

L_3——连接架长度

d_2——连杆和整形压板连接点到整形压板和连接架连接点距离

d_3——移动螺纹副左端点和连接架左端点之间距离

h——移动螺纹副与连接架之间的垂直距离

β——连杆与整形压板之间夹角

θ——移动螺纹副左端点和连接架左端点连线与垂直方向的夹角

η——连杆与移动螺纹副左端点和连接架左端点连线之间夹角

利用以上三角函数关系，得到β、η、θ关系式和整形角γ为

$$\alpha = \eta - \theta \tag{4}$$

$$\gamma = 90^\circ - (\alpha + \beta) \tag{5}$$

定义整形电机逆时针旋转时电机旋转圈数n为负值，顺时针为正值，电机旋转圈数与目标整形角度γ之间的函数关系满足

$$\gamma = \frac{\pi}{2} - \frac{4\left(L_1^2 - d_2^2\right)^2 + \left(L_2 - L_3\right)^2 + 4\left(h + d_m n\right)^2}{4L_1\sqrt{\left(L_2 - L_3\right)^2 + 4\left(h + d_m n\right)^2}} - \frac{4\left(L_1^2 + d_2^2\right) - \left(L_2 - L_3\right)^2 - 4\left(h + d_m n\right)^2}{8L_1 d_2} + \arctan\frac{L_2 - L_3}{2\left(h + d_m n\right)} \tag{6}$$

根据式(6)获得整形角为20°~70°，在角度范围内采样电机旋转圈数与整形角度对应点如图3c所示。从图3中可以看出，整形单元初始角γ_0为41°，对采样点进行线性拟合获得n与γ的线性关系式为

$$n = \frac{41^\circ - \gamma}{5} \tag{7}$$

若整形角度增大γ_a，电机需逆时针旋转$\gamma_a/5$。根据电机圈数和方向的不断调整，可实现不同整形角度的调整和精准控制，为原料肉的高效准确成像奠定基础。

1.4　其他单元参数确定

1.4.1　样品驱动传输单元

样品驱动传输单元主要实现整个检测过程肉品传输、样品整形、扫描外触发控制、扫描成像等环节的配合运作及连续工作，其速度范围为20~100 mm/s，实际运行过程如图4所示。由于光电传感器存在延时时间t(0.5 s)，因此为了保证肉品整体轮廓成像的完整性，在传输速度v(20~100 mm/s)驱动下，光电传感器需与3D激光扫描仪保持最短距离d_h，即d_h≥50 mm。

1.4.2　可实现轮廓整形的成像检测平台

该平台由原料肉轮廓整形单元、3D激光扫描仪(AR-7250线阵激光型，优可测)、光电传感器(BX-662型，精嘉科)、旋转编码器(E6B2-CWZ1X型，OMRON，日本)、成像暗箱、光学调节支架等部件组成。线阵激光高度测量范围(570±85) mm，宽度测量范围225~250 mm，光电传感器采用漫反射型，旋转编码器为差分电压输出型，成像暗箱和光学调节支架均为自主研发，如图5所示。

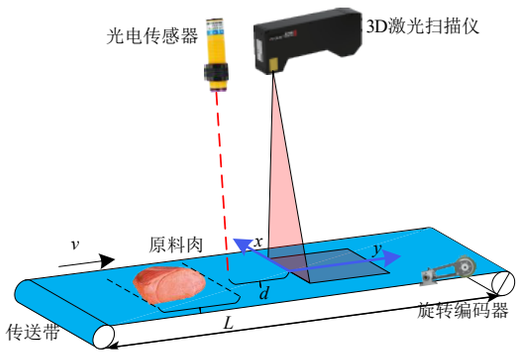


图4　3D激光扫描仪实现肉块实时成像示意图

Fig. 4　Schematic of 3D laser scanner realizing real-time imaging of meat pieces

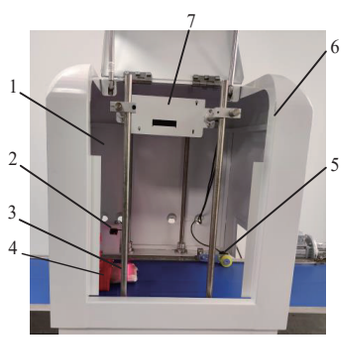


图5　可实现轮廓整形的成像检测平台

Fig. 5　Imaging inspection platform enabling contour shaping

1. 光学调节支架　2. 光电传感器　3. 激光线　4. 轮廓整形单元　5. 旋转编码器　6. 成像暗箱　7. 三维激光扫描仪

为避免成像失真，则φ_2需满足

$$\varphi_2 = \arctan\frac{h_s \tan\varphi}{h_s - h_m} \tag{8}$$

式中　h_s——扫描仪感测头布置高度，取570 mm

h_m——待测原料肉的高度

φ——扫描仪光源照射面与相机接收光线之间夹角，取18°

而z轴(高度)测量最近距离为485 mm时，φ为21°。此时φ_1为69°，结合公式(6)，则整形单元具体整形角度须满足20°≤γ≤69°。同时本系统所采用传送带宽(480 mm)大于成像系统宽度测量范围(225~250 mm)，被扫描样品最大高度为85 mm。

1.4.3　原料肉扫描外触发控制单元

外触发控制单元电路原理图如图6所示，由三维激光扫描仪U1(AR-7250型，红色半导体激光)、光电传感器U3(BX-662型，NPN输出常开常闭一体)、PLC U4(S7-200 Smart型，继电器输出)、整形电机U5(DC24型，龙俊)、旋转编码器U2(E6B2-CWZ1X型，OMRON，日本)等部件组成。激光扫描仪通过接收编码器差分电压式脉冲信号进行首次扫描与二次整形扫描的2个过程，获取2次轮廓数据传输至上位机进行数据分析操作。

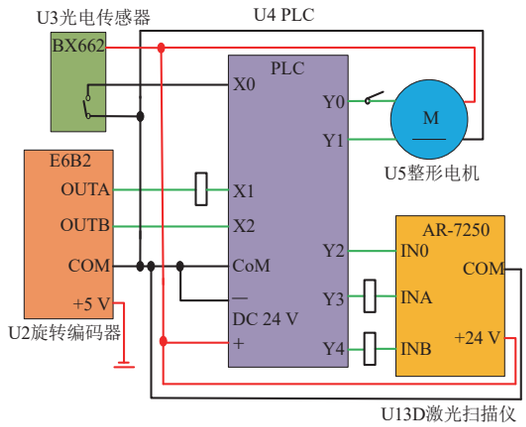


图6 肉块扫描外触发控制单元

Fig. 6 Meat block scanning external trigger control unit

2 原料肉可视化成像软件设计

2.1 原料肉轮廓整形3D可视化成像软件设计

本文开发的上位机软件以PC为硬件平台，开发环境为Windows 10系统，软件程序利用Halcon和Visual C#作为开发平台。如图7所示，成像系统主要包括了IP地址连接模块、相机参数设置和标定模块、整形参数设置模块、3D图像显示模块、图像处理模块和数据分析模块。主要通过整形参数模块匹配不同原料肉类别设定不同的整形角度，之后进行扫描后轮廓图像的预处理和孔洞补偿，包括阈值分割、中值滤波和灰度膨胀运算等操作，最终实现优化待测肉块扫描体积的估测。

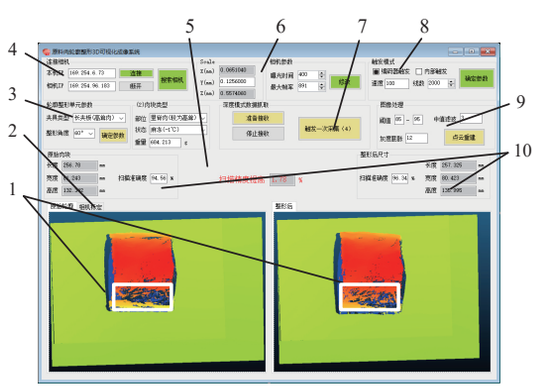


图7 原料肉轮廓整形3D可视化成像软件操作界面

Fig. 7 Raw meat contour shaping 3D visualization imaging software operation interface

1. 原料肉整形前后图像显示区 2. 相机标定区 3. 整形参数选择区 4. IP地址连接区 5. 精度提高区 6. 装置参数设置区 7. 图像采集区 8. 图像采集模式选择区 9. 图像处理区 10. 数据显示区

2.2 原料肉轮廓成像与体积估测算法开发

原料肉轮廓成像与体积估测需要完成深度图像处理和图像转点云2个数据处理环节（图8）：深度图像处理中[23]，首先选择灰度阈值为0~50将扫描孔洞分离，调用gray_函数并迭代对孔洞区域进行灰度膨胀，实现孔洞填充[24-25]，与原始图像合并为最新深度图像，最后运用滤波算法[26-28]消除无效噪声得到完整深度图像。在深度图像转3D点云环节，用内外参转换矩阵将深度图像转换为3D模型，得到从深度图像点$[u_n, v_n]^T$到3D坐标点$[x_w, y_w, z_w]^T$的变换公式

$$z_c\begin{bmatrix}u_n\\v_n\\1\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}f/d_x & 0 & u_0\\0 & f/d_y & v_0\\0 & 0 & 1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}1&0&0&0\\0&1&0&0\\0&0&1&0\end{bmatrix}\begin{bmatrix}x_w\\y_w\\z_c\\1\end{bmatrix} \tag{9}$$

$$\begin{cases}x_w = z_c(u_n - u_0)d_x/f\\y_w = z_c(v_n - v_0)d_y/f\\z_w = z_c\end{cases} \tag{10}$$

式中 (u_n, v_n)——深度图像坐标系下任意位置坐标

(u_0, v_0)——图像中心坐标

$(x_w、y_w、z_w)$——3D坐标系下的坐标

z_c——扫描仪采集相机坐标的z值，即目标到相机的距离

f——相机焦距

$d_x、d_y$——像素在x、y轴方向的物理尺寸

设置直通滤波阈值87~101以调整Z轴区域尺寸确定起算面进行平面拟合，最后利用模型投影体积测量算法得到原料肉的估测体积。

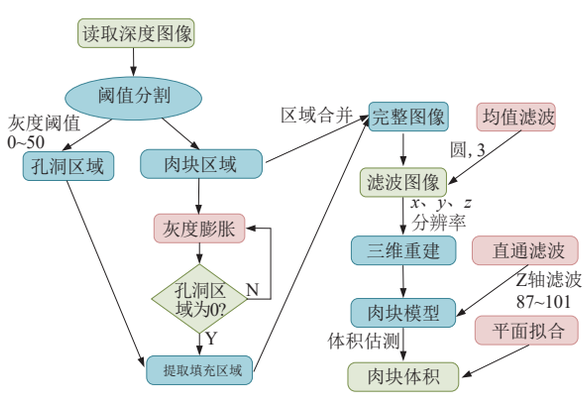


图8 深度图像灰度膨胀孔洞补偿和深度图像转3D点云体积估测算法流程图

Fig. 8 Flowchart of algorithm for depth image gray expansion hole compensation and depth image to 3D point cloud volume estimation

3 试验结果与分析

3.1 试验材料与方法

在淄博数字农业农村研究院预制菜数字加工装备研发中心选用中式菜肴常用的猪里脊肉与后腿肉进行试验。试验样品购自山东省淄博市圣豪超市，用0~4 ℃恒温箱运至实验室，并放置冷藏冰箱中备用。为探究肉块类型、质量、贮藏状态和形状对研发的整形单元的普适性，里脊肉和后腿肉各60块，共120块，每种肉块修剪至100、300、500、700、900 g左右，温度采用国标GB/T 9959.1—2019[29]结合实验室海尔冰箱冷藏柜设置5 ℃保存12 h作为冷鲜肉进行试验。另设置介于

冷鲜和冷冻之间的麻冻温度(-1 ℃)保存24 h作为麻冻肉试验，该温度下肉块内部存在冰晶，更易于整形，且分切不易粘刀。

后续试验取出后立即进行扫描测试与体积估测，试验重复3次，与实际体积进行对比(实际体积依据肉块质量和平均密度获得)，获得肉块扫描结果和精度。

本试验所用原料肉3D可视化成像系统参数分别设置为：传送带移动速度v为100 mm/s，变频器频率50 Hz，旋转编码器滚轮直径d为50 mm，整形单元整形角为30°~60°，继电器设定时间t为0.3 s，触发模式选择编码器触发，3D激光扫描仪放置高度h_s为570 mm，最大采样帧率f_p为900Hz，扫描y轴分辨率为0.125 6。

3.2　原料肉不同旋转角度成像结果对比

为验证成像系统对肉块在不同角度摆放下成像稳定性和精度，按照不同部位和质量随机挑选8个肉块，与传送带移动方向摆放角分别呈90°、180°、270°、360°，并进行扫描成像与体积估测，测试结果如表1所示。结果表明，不同角度下肉块体积估测准确率均不小于90%，较大误差出现在肉块偏小的组别中，但均小于9.22%。结合表2得到体积估测准确率标准差(Standard deviation，SD)和变异系数(Coefficient of variation，CV)，同一块肉在4种角度下的变异系数均不超过3%，证明了可视化轮廓成像系统对不同摆放角度下肉块体积估测的稳定性。

3.3　冷鲜肉与麻冻肉整形前后成像效果对比

为验证不同状态肉块整形前后对成像效果的影响，试验组整形角度γ分别选择30°、40°、50°、60°，未整形原料肉作为对照组。为保证扫描结果准确性，对每个整形角度扫描3次取平均值。

图9a、9b为冷鲜状态下肉块整形前后的成像效果，可以看出，冷鲜状态下未整形原料肉成像效果明显低于整形后。其中里脊肉对照组体积估测准确度约为90%，整形后提高到94%以上，并且30°~50°范围的成像效果优于60°。这可能是较大的整形角度导致扫描坡度变陡，成像误差加剧。对于去骨后腿肉，对照组准确率低于里脊对照组，约为84%。在30°~60°范围内成像效果变化不明显，这可能是由于后腿区域组织结构复杂，肉块形态多样[30]，一定整形角度后激光线已能完全照射肉块，再增大整形角度反射光线变化不明显，整体准确率趋于稳定。

图9c、9d为麻冻里脊肉和后腿肉整形前后成像效果对比结果。可以看出，麻冻状态下成像效果与冷鲜肉一致，但整体高于冷鲜原料肉。其中麻冻里脊肉在整形角30°~50°的扫描准确率不小于97%，提高约7个百分点。麻冻状态肉块的最佳整形角度与冷鲜肉一致。

本试验中原料肉样品轮廓整形前后可视化成像结果具体如图10所示。从图10可以看出，整形后的肉块两侧坡度更有利于激光扫描仪测量，整形后肉块体积估测准确率均不小于97%。不同质量、不同部位肉对应的最佳整形角度也不同。试验验证结果证明，基于开发的可视化轮廓成像系统，根据肉块形状选择合适的整形角度可实现不同部位、不同质量原料肉的高精度成像。

表1　不同尺寸肉块在不同角度下体积估测结果

Tab. 1　Volume estimation results for different sizes of meat blocks at different angles

肉块体积/mm³	摆放角/(°)	测量体积/mm³	准确率/%	测量误差/%
97 538	0	104 334.67	93.49	6.51
	90	102 891.67	94.80	5.20
	180	105 894.67	92.11	7.89
	270	100 832.57	96.73	3.27
311 795	0	343 443.30	90.78	9.22
	90	336 996.30	92.52	7.48
	180	323 350.67	96.43	3.57
	270	337 703.33	92.33	7.67
501 641	0	525 778.67	95.41	4.59
	90	531 791.33	94.33	5.67
	180	521 728.33	96.15	3.85
	270	532 333.00	94.23	5.77
663 897	0	720 665.33	92.12	7.88
	90	688 038.67	96.49	3.51
	180	697 277.00	95.21	4.79
	270	703 567.33	94.36	5.64
103 795	0	110 021.33	94.34	5.66
	90	110 061.00	94.31	5.69
	180	110 901.67	93.59	6.41
	270	111 242.00	93.31	6.69
286 360	0	296 847.33	96.47	3.53
	90	291 176.33	98.35	1.65
	180	294 760.00	97.15	2.85
	270	292 038.00	98.06	1.94
504 923	0	521 622.67	96.80	3.20
	90	546 561.33	92.38	7.62
	180	545 331.33	92.59	7.41
	270	543 347.67	92.93	7.07
717 231	0	760 918.33	94.26	5.74
	90	776 969.00	92.31	7.69
	180	754 638.67	95.04	4.96
	270	765 119.00	93.74	6.26

表2　不同摆放角成像效果误差

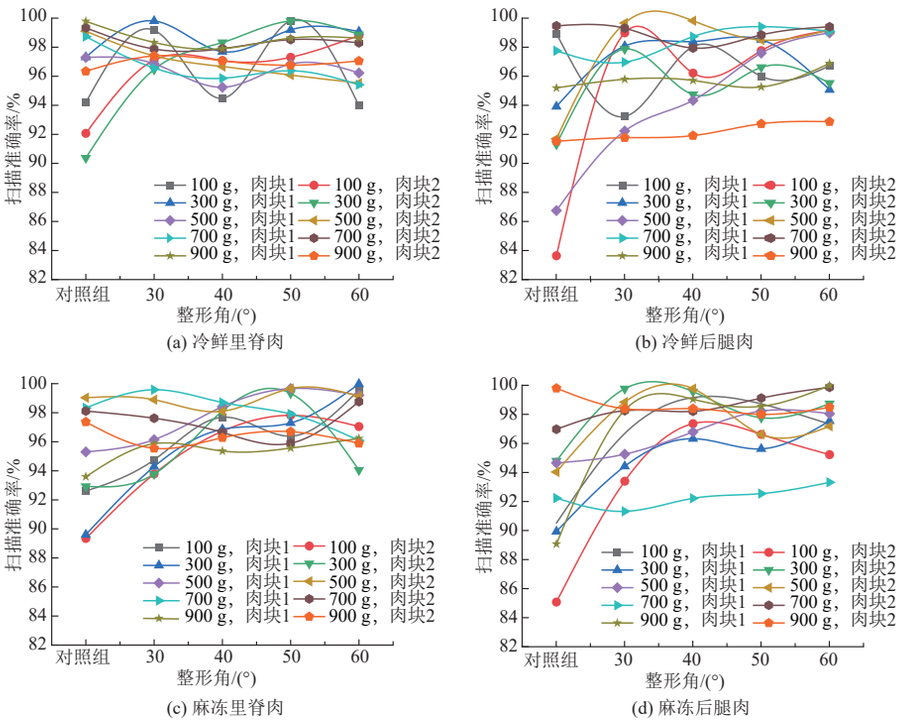
Tab.2　Error analysis of imaging effect at different angles

测量体积/mm³	平均值/mm³	标准差/mm³	变异系数/%
97 538	103 488.4	2 153.74	2.08
311 795	335 373.4	8 519.21	2.54
501 641	527 907.8	5 078.82	0.96
663 897	702 387.1	8 802.33	1.25
103 795	110 556.5	611.29	0.55
286 360	293 705.4	2 592.32	0.88
504 923	539 215.8	11 803.18	2.19
717 231	764 411.3	9 414.55	1.23

3.4　整形后肉品回弹性对成像性能影响

由于原料肉的粘弹性属性，整形后肉块会发生回弹，影响成像效果[31]。已知本研究在传送带最快速度下整形后到三维激光扫描仪扫描的时间约为3 s，因此对整形后原料肉每隔3 s进行一次回弹测试，共进行

10次试验。设置未整形原料肉为对照组，测量不同回弹时间下肉块最大孔洞高度压缩比和扫描体积估测准确度，以不同回弹时间时体积估测准确度之间的标准差和变异系数作为肉块整形后回弹程度的评判标准。



(a) 冷鲜里脊肉 (b) 冷鲜后腿肉

(c) 麻冻里脊肉 (d) 麻冻后腿肉

图9 不同部位不同温度原料肉块整形前后扫描结果对比图

Fig. 9 Comparison of scanning results before and after shaping of raw meat blocks from different parts with different temperatures

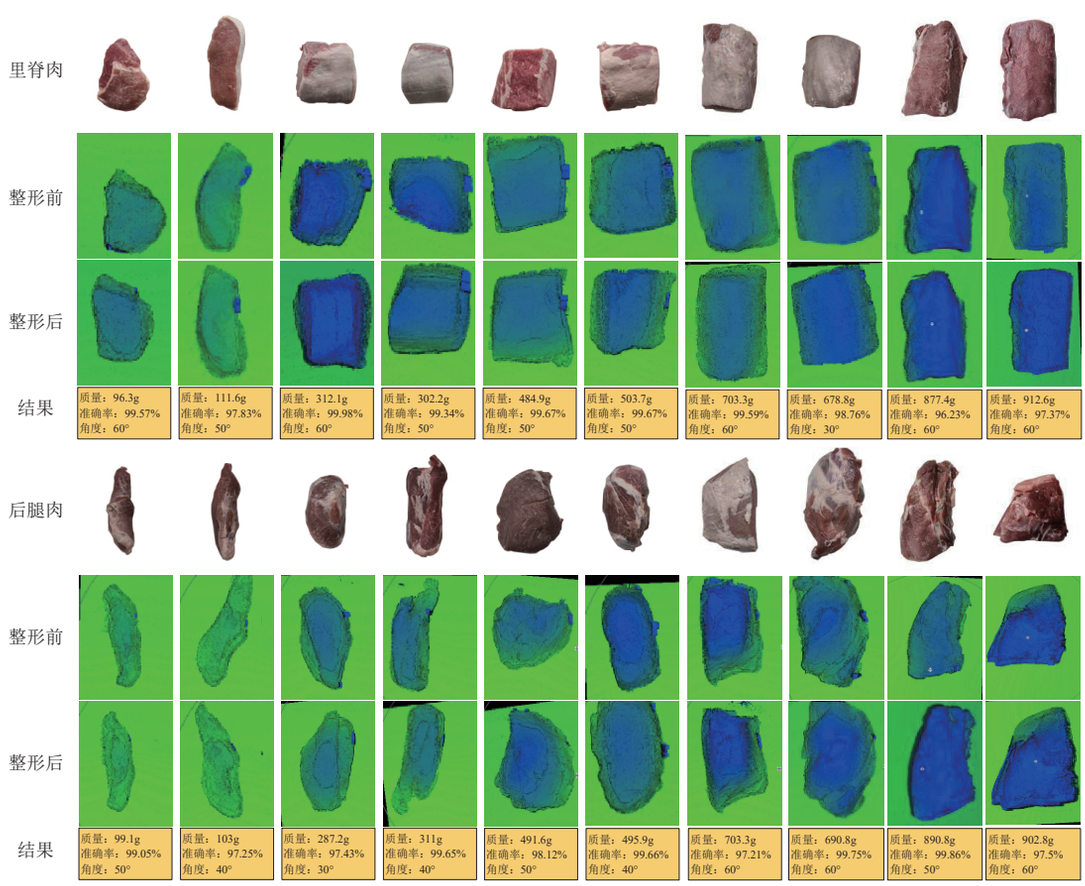


图10 最佳整形角整形前后轮廓对比示意图

Fig.10 Comparison of contour before and after shaping with the best shaping angle

由表3可知，整形后肉块最大孔洞高度均低于整形前。不同肉块整形后的压缩量和稳定时间不同，冷鲜状态下的里脊肉和后腿肉回弹速度较快，分别在9 s和6 s以后出现明显回弹，最大孔洞高度压缩比平均值分别为0.71和0.76，而麻冻状态回弹较为缓慢，均在12 s后出现明显回弹，最大孔洞高度压缩比平均值均为0.77，这可能由于麻冻肉内部存在的冰晶影响了回弹效率[32-33]。统计学分析结果表明，整形后扫描精度有明显提升，回弹前后肉块标准差均小于1.21 mm^3，变异系数均小于1.26%，这说明不同状态肉块回弹时间对体积估测准确性和稳定性影响较小。

表3　原料肉整形后轮廓稳定时间分布

Tab. 3　Distribution of contour stabilization time after raw meat shaping

肉块	回弹时间/s	最大孔洞高度压缩比	准确率/%	标准差/%	变异系数/%
冷鲜里脊肉1/2/3	0	1/1/1	89.56/90.56/90.43		
	3	0.78/0.72/0.59	93.51/94.51/94.2		
	6	0.79/0.72/0.61	93.3/94.3/93.53	0.42/0.45/0.41	0.45/0.48/0.44
	9	0.81/0.72/0.61	92.7/93.7/93.46		
	12~30	0.84/0.72/0.61	92.24/93.24/93.35	0.59/0.58/0.66	0.64/0.62/0.71
麻冻里脊肉1/2/3	0	1/1/1	93.58/92.49/93.59		
	3	0.91/0.66/0.67	97.21/97.59/97.73		
	6	0.91/0.67/0.68	97.07/97.23/97.32	0.54/0.42/0.52	0.56/0.43/0.54
	9	0.91/0.68/0.69	96.67/96.82/96.83		
	12	0.92/0.69/0.7	96/96.66/96.54		
	15~30	0.93/0.69/0.71	95.58/96.46/96.53	1.06/0.75/1.21	1.11/0.78/1.26
冷鲜后腿肉1/2/3	0	1/1/1	91.09/98.9/90.36		
	3	0.85/0.74/0.65	94.95/99.97/96.6	0.38/0.12/0.22	0.4/0.12/0.23
	6	0.86/0.76/0.66	94.41/99.81/96.29		
	9~30	0.88/0.77/0.69	94.28/99.74/96.23	1.16/0.38/0.88	1.24/0.39/0.92
麻冻后腿肉1/2/3	0	1/1/1	90.97/94.06/96.93		
	3	0.63/0.8/0.82	97.23/97.95/99.22		
	6	0.63/0.82/0.83	96.81/97.79/99.1	0.29/0.33/0.35	0.3/0.33/0.35
	9	0.64/0.82/0.83	96.63/97.41/98.7		
	12	0.64/0.83/0.84	96.58/97.25/98.47		
	15~30	0.65/0.84/0.85	96.43/97.17/98.11	1.11/0.9/0.65	1.16/0.93/0.66

4　结论

（1）设计了一种可实现原料肉形态调整的轮廓整形单元，并搭建3D可视化成像平台。整形电机每旋转1/5圈，整形角度变化1°，整体可实现在20°~69°角度范围的轮廓整形。

（2）设计了原料肉3D可视化成像软件，可实现整形前后原料肉轮廓形态实时监测、孔洞高度自动读取、体积估测准确率计算，里脊肉冷鲜与麻冻状态下轮廓整形后回弹时间内最大孔洞高度压缩比分别为0.71和0.77，后腿肉分别为0.76和0.77，麻冻状态下孔洞压缩比高于冷鲜状态。

（3）整形单元对里脊肉和后腿肉的最佳整形角为30°~50°和40°~60°，整形后二者的体积估测准确度分别达到94%和97%。原料肉回弹前后体积估测精度标准差均小于1.21%，回弹后标准差较回弹前有明显提高，变异系数不高于1.26%。冷鲜里脊肉和后腿肉的回弹时间分别为9 s和6 s，麻冻肉均为12 s。摆放角度对肉块体积估测精度影响较小，均高于90%，变异系数为3%。研究证明，不规则原料肉经过轮廓整形单元处理后，其体积估测精度明显提高，这为后续原料肉智能化定量分切装置的研发提供技术支持。

参　考　文　献

[1]　国家统计局. 中国统计年鉴[M]. 北京：中国统计出版社，2023.

[2]　王树才，陶凯，李航. 基于机器视觉定位的家禽屠宰净膛系统设计与试验[J]. 农业机械学报，2018，49(1)：335－343.
WANG Shucai，TAO Kai，LI Hang. Design and experiment of poultry eiscerator system based on machine vision positioning[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2018，49(1)：335－343.(in Chinese)

[3]　刘毅，丛明，刘冬，等. 基于改进遗传算法与机器视觉的工业机器人猪腹剖切轨迹规划[J]. 机器人，2017，39(3)：377－384.
LIU Yi，CONG Ming，LIU Dong，et al. Trajectory planning for porcine abdomen cutting based on an improved genetic algorithm and machine vision for industrial robot[J]. Robot，2017，39(3)：377－384.(in Chinese)

[4] 丛明, 王亚辉, 杜宇, 等. 基于点云聚类与PCA的机器人猪腹剖切方法[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2020, 48(11): 54-59.
CONG Ming, WANG Yahui, DU Yu, et al. Porcine abdomen cutting method using robot based on point cloud clustering and PCA[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology(Natural Science Edition), 2020, 48(11): 54-59.(in Chinese)

[5] XU W, HE Y, LI J, et al. Robotization and intelligent digital systems in the meat cutting industry: from the perspectives of robotic cutting, perception, and digital development[J]. Trends in Food Science & Technology, 2023, 135: 234-251.

[6] 樊仲谋, 邱梓轩. 基于立方体格网法的树冠体积计算与预估模型建立[J]. 农业机械学报, 2015, 46(3): 320.
FAN Zhongmou, QIU Zixin. Tree crown volume calculation and prediction model establishment using cubic lattice method [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(3): 320.(in Chinese)

[7] 张新, 高超, MARTIN Kraft, 等. 基于"双毯法"的植物叶态萎蔫辨识研究[J]. 农业机械学报, 2016, 47(11): 322-328.
ZHANG Xin, GAO Chao, MARTIN Kraft, et al. Identification of plant leaf wilting based on double blanket method[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(11): 322-328.(in Chinese)

[8] STEEN B, REIDAR M, AABY V, et al. An automated salmonid slaughter line using machine vision [J]. Industrial Robot: An International Journal, 2011, 38(4): 399-405.

[9] NYALALA I, OKINDA C, MAKANGE N, et al. On-line weight estimation of broiler carcass and cuts by a computer vision system[J]. Poultry Science, 2021, 100(12): 101474.

[10] ADAMCZAK L, CHMIEL M, FLOROWSKI T, et al. The use of 3D scanning to determine the weight of the chicken breast [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2018, 155: 394-399.

[11] PUIG P, MUNOZ B, ESPINOSA V, et al. Automatic Bluefin Tuna (Thunnus thynnus) biomass estimation during transfers using acoustic and computer vision techniques[J]. Aquacultural Engineering, 2019, 85: 22-31.

[12] STURO Ø, ØYE E, SKAVHAUG A, et al. A 3D machine vision system for quality grading of Atlantic salmon [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2016, 123: 142-148.

[13] ALEMPIJEVIC A, VIDAL-C, FALQUE R, et al. Lean meat yield estimation using a prototype 3D imaging approach[J]. Meat Science, 2021, 181: 108470.

[14] 马骏骁, 龚泽, 康家铭, 等. 基于线激光扫描的鱼类定量切段方法[J]. 食品与机械, 2022, 38(10): 87-92.
MA Junxiao, GONG Ze, KANG Jiaming, et al. Research on quantitative fish segmentation method based on line laser scanning[J]. Food & Machinrty, 2022, 38(10): 87-92.(in Chinese)

[15] 肖哲非, 马田田, 张军文, 等. 基于深度学习的高压水鱼片切段装置控制系统设计[J]. 渔业现代化, 2023, 50(5): 79-89.
XIAO Zhefei, MA Tiantian, ZHANG Junwen, et al. Design of system with high-pressure water jet based on deep learning[J]. Fishery modernization, 2023, 50(5): 79-89.(in Chinese)

[16] 王树才, 陶凯, 李航. 基于机器视觉定位的家禽屠宰净膛系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2018, 49(1): 335-343.
Wang Shucai, Tao Kai, Li Hang. Design and Experiment of Poultry Eviscerator System Based on Machine Vision Positioning [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(1): 335-343.(in Chinese)

[17] 济南好为尔机械有限公司. 食物定重切割方法及食物切割机: 102729289B[P]. 2015.

[18] LIU Y, GUO C, ER M. Robotic 3-D laser-guided approach for efficient cutting of porcine belly [J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2022, 27(5): 2963-2972.

[19] BOOGAARD F, HENTEN E, KOOTSTRA G. The added value of 3D point clouds for digital plant phenotyping - a case study on internode length measurements in cucumber[J]. Biosystems Engineering, 2023, 234: 1-12.

[20] AZARMDEL H, MOHTASEBI S, JAFARI A, et al. Developing an orientation and cutting point determination algorithm for a trout fish processing system using machine vision[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2019, 162: 613-629.

[21] PEZZUOLO A, MILANI V, ZHU D, et al. On-barn pig weight estimation based on body measurements by structure-from-motion (SfM) [J]. Sensors, 2018, 18(11):3603.

[22] BAO X, LENG J, MAO J, et al. Cutting of sheep carcass using 3D point cloud with dual-robot system[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2022, 15(5): 163-171.

[23] KAMARI M, HAM Y. Vision-based volumetric measurements via deep learning-based point cloud segmentation for material management in jobsites[J]. Automation in Construction, 2021, 121: 103430.

[24] 路红, 陈立潮, 潘理虎, 等. 基于多主体技术和数学形态学的空间聚类算法[J]. 计算机工程, 2012, 38(18): 158-161.
LU Hong, CHEN Lichao, PAN Lihu, et al. Spatial clustering algorithm based on multi-agent technology and mathematic morphology[J]. Computer Engineering, 2012, 38(18): 158-161.(in Chinese)

[25] 赵玉华, 袁峰, 张秋佳, 等. 基于形态学和光流方程的光斑中心计算方法[J]. 激光与红外, 2014, 44(2): 213-216.
ZHAO Yuhua, YUAN Feng, ZHANG Qiujia, et al. Spot centre arithmetic based on morphology and optical flow equation[J]. Laser & Infrared, 2014, 44(2): 213-216.(in Chinese)

[26] LIU X, WU Z, WANG X. Validity of non-local mean filter and novel denoising method[J]. Virtual Reality & Intelligent Hardware, 2023, 5(4): 338-350.

[27] LI S, BI X, ZHAO Y, et al. Extended neighborhood-based road and median filter for impulse noise removal from depth map[J]. Image and Vision Computing, 2023, 135: 104709.

[28] WANG M, ZHENG S, LI X, et al. A new image denoising method based on Gaussian filter[C]//2014 International Conference on Information Science, Electronics and Electrical Engineering (TSEEE), 2014.
[29] 国家市场监督管理总局,中国国家标准化管理委员会.GB/T 9959.1-2019 鲜、冻猪肉及猪副产品 第1部分:片猪肉[S].北京:农业农村部, 2019.
[30] 谢斌, 矫伟鹏, 刘楷东, 等. 基于接触状态感知的羊胴体后腿自适应分割控制方法[J]. 农业机械学报, 2023, 54(9): 306-315.
XIE Bin, JIAO Weipeng, LIU Kaidong, et al. Adaptive segmentation control method of sheep carcass hind legs based on contact state perception[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(9): 306-315.(in Chinese)
[31] MYHAN R, MARKOWSKI M, DASZKIEWICZ T, et al. Non-linear stress relaxation model as a tool for evaluating the viscoelastic properties of meat products[J]. Journal of Food Engineering, 2015, 146: 107-115.
[32] 苏光明, HOSAHALLI S Ramaswamy, 于勇, 等. 牛肉高压冷冻过程中热变化和冰晶形态研究[J]. 农业机械学报, 2014, 45(3): 206-214.
SU Guangming, HOSAHALLI S Ramaswamy, YU Yong, et al. Thermal behaviors and ice crystal properties in pressure shift freezing of beef[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(3): 206-214.(in Chinese)
[33] 孙光全, 冯耀泽, 朱明, 等. 面向长途冷链下不同冷冻方式对大口黑鲈品质的影响[J]. 农业工程学报, 2023, 39(24): 316-326.
SUN Guangquan, FENG Yaoze, ZHU Ming, et al, Effects of different freezing methods on the quality of *Micropterus salmoides* oriented to long-distance cold chain[J]. Transactions of the CSAE, 2023, 39(24): 316-326.(in Chinese)

(上接第287页)

[7] 黄铝文,关非凡,谦博,等.基于2D DWT与MobileNetV3融合的轻量级茶叶病害识别[J].农业工程学报,2023,39(24):207-214.
HUANG Lüwen, GUAN Feifan, QIAN Bo, et al. Lightweight tea disease recognition based on fusion of 2D DWT and MobileNetV3 [J]. Transactions of the CSAE, 2023,39(24):207-214.(in Chinese)
[8] 左昊轩,黄祺成,杨佳昊,等.基于改进YOLO v5s的作物黄化曲叶病检测方法[J].农业机械学报,2023,54(增刊1):230-238.
ZUO Haoxuan, HUANG Qicheng, YANG Jiahao, et al. Detection method of crop yellowing leaf curve based on improved YOLO v5s [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023,54(Supp.1):230-238.(in Chinese)
[9] REN S, HE K, GIRSHICK R, et al. Faster R-CNN: towards real-time object detection with region proposal networks [J]. IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.,2017,39(6):1137-1149.
[10] LIU W, ANGUELOV D, ERHAN D, et al. SSD: single shot multibox detector [C]//Computer Vision-ECCV 2016: 14th European Conference,2016:21-37.
[11] ORCHI H, SADIK M, KHALDOUN M, et al. Real-time detection of crop leaf diseases using enhanced YOLO v8 algorithm [C] 2023 IWCMC,2023:1690-1696.
[12] YANG Z,FENG H,RUAN Y,et al.Tea tree pest detection algorithm based on improved Yolov7-Tiny[J].Agriculture,2023,13(5):1031.
[13] SHI Q,LI C,GUO B, et al.Manipulator-based autonomous inspections at road checkpoints:application of faster YOLO for detecting large objects[J].Defence Technology,2022,18(6):937-951.
[14] 李就好,林乐坚,田凯,等.改进Faster R-CNN的田间苦瓜叶部病害检测[J].农业工程学报,2020,36(12):179-185.
LI Jiuhao, LIN Lejian, TIAN Kai, et al. Improved field disease detection of bitter melon leaves by Faster R-CNN [J]. Transactions of the CSAE, 2020,36(12):179-185. (in Chinese)
[15] XUE Z,XU R,BAI D,et al.YOLO-tea:a tea disease detection model improved by YOLO v5[J].Forests,2023,14(2):415.
[16] 柳春源,陈洪建,曾小辉,等.基于 YOLO-V5与 ResNet50 的农田害虫检测[J].人工智能与机器人研究,2022,11(3):236-247.
LIU Chunyuan, CHEN Hongjian, ZENG Xiaohui, et al. Detection of farmland pests based on YOLO-V5 and ResNet50 [J]. Research on Artificial Intelligence and Robotics, 2022,11(3):236-247. (in Chinese)
[17] 时雷,杨程凯,雷镜楷,等.基于改进YOLO v8s的小麦小穗赤霉病检测研究[J].农业机械学报,2024,55(7):280-289.
SHI Lei, YANG Chengkai, LEI Jingkai, et al. Wheat spikelet detection of fusarium head blight based on improved YOLO v8s [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024,55(7):280-289. (in Chinese)
[18] 胡灿,王兴旺,王旭峰,等.基于Android手机的田间棉花产量预测系统设计[J].农业机械学报,2023,54(增刊2):252-259,277.
HU Can, WANG Xingwang, WANG Xufeng, et al. Design of field cotton yield prediction system based on Android phone [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023,54(Supp.2):252-259,277. (in Chinese)
[19] 乐羿成. 基于Android的作物冠层抓拍传输及其图像自动管理系统开发[D]. 杭州:浙江理工大学, 2017.
YUE Yicheng. Development of Android based capture & transmission of crop canopy and automatic system on its image management[D]. Hangzhou:Zhejiang Sci-Tech University, 2017. (in Chinese)
[20] 刘万学,腩乃阳,韩爽,等.基于Android和深度学习的外来入侵植物智能识别系统[J].植物保护,2021,47(4):174-179,233.
LIU Wanxue, KUAI Naiyang, HAN Shuang, et al. Intelligent recognition system for invasive alien plants based on Android and deep learning [J]. Plant Protection, 2021,47 (4) : 174-179, 233. (in Chinese)
[21] FU-KUAN W , YI-QI H , ZHAO-CHENG H , et al. MRUNet: a two-stage segmentation model for small insect targets in complex environments[J]. Journal of Integrative Agriculture,2023,22(4):1117-1130.
[22] ZHANG X Y, ZHOU X Y, LIN M X, et al. ShuffleNet: an extremely efficient convolutional neural network for mobile devices [C]// Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition,2018:6848-6856.
[23] WANG T, CHEN Q, LANG X, et al. Detection of oscillations in process control loops from visual image space using deep convolutional networks[J]. IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica,2024,11(4):982-999.
[24] CHEN J, KAO S, HE H, et al. Run, don't walk: chasing higher FLOPS for faster neural networks [C]//Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2023:12021-12031.