

DOI: 10.13652/j.issn.1003-5788.2021.04.020

# 糙米轮廓截面激光连续扫描机电系统开发

## Development of a continuous laser scanning electromechanical system for brown rice profile cross section

杨泗苹<sup>1</sup> 汤晓华<sup>1</sup> 李天骄<sup>2</sup> 郑龙安<sup>3</sup> 安嘉强<sup>4</sup>YANG Si-ping<sup>1</sup> TANG Xiao-hua<sup>1</sup> LI Tian-jiao<sup>2</sup> ZHENG Long-an<sup>3</sup> AN Jia-qiang<sup>4</sup>

(1. 北京工商大学人工智能学院, 北京 100048; 2. 首都机场集团公司北京大兴国际机场, 北京 102604;

3. 北京大豪科技股份有限公司, 北京 100015; 4. 北京科技大学机械工程学院, 北京 100083)

(1. School of Artificial Intelligence, Beijing Technology and Business University, Beijing 100048, China; 2. Beijing Daxing International Airport, Beijing 102604, China; 3. Beijing Dahao Technology Co., Ltd., Beijing 100015, China; 4. School of Mechanical Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

**摘要:**开发了激光扫描糙米轮廓测量装置,其机构原理适应表征糙米几何特征的点云数据采集,通过相互垂直三轴移动、两轴转动实现糙米椭球环扫、胚芽偏转及其主截面直线扫描;并对糙米椭球进行环形离散、连续激光扫描测量。结果表明,连续、离散扫描数据描述糙米表面具有一致性,且误差满足测试要求,试验装置可实现胚芽部分主截面直线离散扫描有效数据采集。

**关键词:**糙米;连续测量;相关性;激光扫描;胚芽

**Abstract:** A laser scanning contour measuring device for brown rice was developed. The mechanism principle of the device was adapted to the point cloud data collection representing the geometric characteristics of brown rice. It has the functions of mutually vertical triaxial movement and two-axis rotation to realize the circular sweep of the ellipsoid of brown rice, the deflection of the embryo and the linear sweep of its main section. The ellipsoid of brown rice was measured by circular discrete and continuous laser scanning. The results showed that the continuous and discrete scanning data were consistent in describing the surface of brown rice, and the errors met the test requirements. The experimental device could realize the effective data acquisition of the main section of germ by linear discrete scanning.

**Keywords:** brown rice; continuous measurement; correlation; laser scanning; germ

稻米脱壳后获得的糙米日益引起重视。建立精确的

三维糙米数字化模型,可为分析糙米在碾白室内加工过程动态仿真提供建模基础。通过建立糙米模型和精米模型,可对胚芽米加工的最小加工量及出米率等参数进行分析,从而为研究新型的胚芽米加工工艺奠定基础<sup>[1]</sup>。同时也为留胚率分析提供依据。

关于留胚率研究,许俐等<sup>[2]</sup>运用机器视觉技术通过对大米轮廓曲线、面积等特征的差异分析实现了无留胚米判别。黄星奕等<sup>[3-4]</sup>通过彩色图像、颜色特征分析,运用饱和度作为判据实现了有无留胚判别。何超<sup>[5]</sup>提出了应用机器视觉技术对留胚米进行胚芽完整度在线检测。Zareiforush 等<sup>[6]</sup>运用模糊控制理论开发了基于图像识别技术的大米加工等级检测系统。Perez 等<sup>[7-8]</sup>运用 3D 网格划分技术仿真大米几何形状建模分析了大米在不同温度下等温浸泡吸水膨胀对破碎的影响。Fant 等<sup>[9]</sup>提出了运用大米图像灰度等级判断大米加工等级。基于机器视觉进行糙米轮廓检测具有许多优点,但存在获取的是二维平面轮廓信息,全面描述糙米三维数据受到制约。

激光非接触检测具有较多优点,刘彩玲等<sup>[10-11]</sup>提出了非规则颗粒材料的三维离散元建模方法实现了种子三维建模。即用三维激光扫描技术获取点云,利用自动化逆向工程软件完成逆向建模,并基于颗粒聚合体理论建立水稻种子的三维离散元模型。曹鹏等<sup>[12]</sup>以激光检测点云为基础,利用主平面投影法获取稻种的六视图投影模型,并应用 Alpha Shape 算法提取投影点云的边缘轮廓。孔祥亮等<sup>[13]</sup>采用激光位移传感器沿糙米椭球长轴垂直截面方向进行离散断层环形扫描,获得点云组合描述糙米表面。但是糙米胚芽部分凸凹陷处因曲率变化较大,扫描轨迹有待进一步优化,同时采集效率和后处理也有待提高。郝方涛等<sup>[14]</sup>提出了依据胚芽与非胚芽部位几何特

**作者简介:**杨泗苹,女,北京工商大学在读硕士研究生。

**通信作者:**汤晓华(1963—),男,北京工商大学教授,博士。

E-mail: tangxiaohua@th.btbu.edu.cn

**收稿日期:**2021-03-10

征采用不同扫描方式以便进一步提高检测效果。吴婧等<sup>[15]</sup>基于激光扫描点云数据运用泊松重建算法原理对点云进行处理并重建糙米模型。

在分析糙米几何特征基础上,文章拟研究高效获取胚芽、非胚芽部分非接触检测数据的机电测控系统工作原理、系统构成、机构特点和标定验证,探索针对糙米轮廓特征激光连续非接触扫描获取更有效的糙米表面点云数据方法,并运用相关性及误差原理分析验证糙米椭球典型截面连续扫描与离散扫描数据的一致性,旨在为提高糙米轮廓激光扫描效率前提下所采集的点云数据精度满足要求。

## 1 检测要求及需求分析

### 1.1 几何特征分析及坐标系

糙米轮廓检测系统要求能够针对糙米几何特征完成高效、准确采样功能<sup>[14,16]</sup>。糙米粒几何形状大体呈椭球体<sup>[13]</sup>,如图1所示假定重心G与糙米椭球坐标重心 $O_G$ 重合,形成 $O_G X_G Y_G Z_G$ 直角坐标系, $a$ 、 $b$ 、 $c$ 为椭球半轴,且 $a > b > c$ ,其中 $b$ 与 $O_G X_G$ 轴重合, $a$ 与 $O_G Y_G$ 轴重合, $c$ 与 $O_G Z_G$ 轴重合。糙米胚芽部位于椭球一端,假定称胚芽部与 $ab$ 半轴椭圆平面相交弧线“ $JX$ ”为胚芽脊线, $\theta$ 为胚芽脊线拟合直线与 $Y_G$ 轴夹角,则胚芽主平面 $H$ 与 $ab$ 半轴椭圆平面垂直,且与胚芽脊线“ $JX$ ”相切于 $J_i$ 点,并与 $ac$ 半轴椭圆平面夹角 $\theta$ 。胚芽主截面为过胚芽脊线点 $J_i$ 与主平面垂直的平面,该平面描述胚芽截面特征。检测数据显示糙米胚芽主截面呈“山”字形<sup>[13]</sup>。

### 1.2 需求分析

完成糙米环形激光断层扫描需要三轴位移运动实现激光光束与糙米空间位置调整,还需要提供糙米自转运动完成环形扫描。其运动可以通过糙米椭球体绕 $a$ 半轴旋转实现。胚芽部分扫描为了提高激光传感器检测效果,需绕 $O_G Z_G$ 轴偏转 $\theta$ 角后实现垂直胚芽主平面完成主截面沿平行于 $O_G Z_G$ 轴直线扫描,因此需要一个绕 $O_G Z_G$ 轴的旋转运动。

## 2 测量机电系统工作原理及分析

### 2.1 工作流程

图2为糙米轮廓扫描流程。其前半段为糙米椭球环

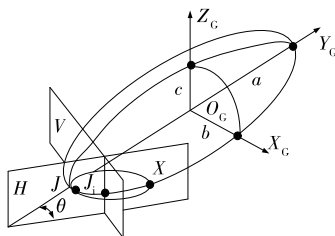


图1 椭球状糙米  
Figure 1 Oval brown rice

形扫描检测流程,后半段为胚芽扫描流程。完成前半段扫描后,进行数据处理并求出 $\theta$ 角,随后继续完成后半段检测。

### 2.2 测控装置构成

糙米测量装置主要由机械系统和测控系统两部分构成(图3)。机械部分实现糙米测量所需运动轨迹,测控系统主要由测量系统和机电控制系统构成。测量完成糙米轮廓数据采集及存储功能,由激光位移传感器、配套控制器和PC构成,控制系统实现对机械系统运动轨迹的控制,控制部分包括控制器、数据交互人机界面两部分,通讯IO接口部分和反馈部分,驱动和电机构成执行部分。

### 2.3 机械系统设计

图4为机械系统运动原理。 $XYZO$ 坐标系为基准坐标系, $X_1 Y_1 Z_1 O_1$ 为激光扫描检测系统坐标系,用于调整激光聚焦。测量过程中,激光头位置不变, $X_2 Y_2 Z_2 O_2$ 为糙米检测位旋转坐标系。后续将胚芽点云与米身点云曲面拼接时,需进行坐标转换<sup>[17]</sup>,利用式(1)可得坐标变换矩阵。

$$g_{st}(\theta) = e^{\hat{\xi}_1 \theta_1} e^{\hat{\xi}_2 \theta_2} e^{\hat{\xi}_3 \theta_3} e^{\hat{\xi}_4 \theta_4} e^{\hat{\xi}_5 \theta_5} g_{st}(0), \quad (1)$$

式中:

$e^{\hat{\xi}_i \theta_i}$  ——运动旋量指数;

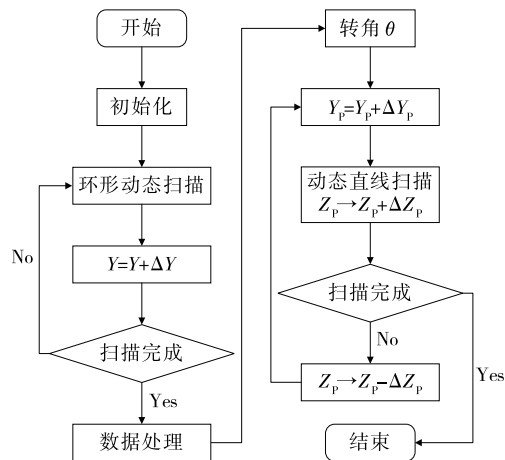


图2 糙米检测工艺流程

Figure 2 Detection process of brown rice

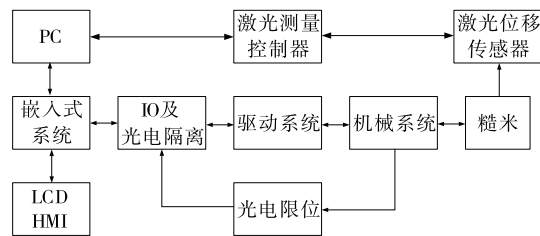


图3 激光扫描糙米轮廓检测装置系统框图

Figure 3 System block diagram of brown rice contour detection device by laser scanning

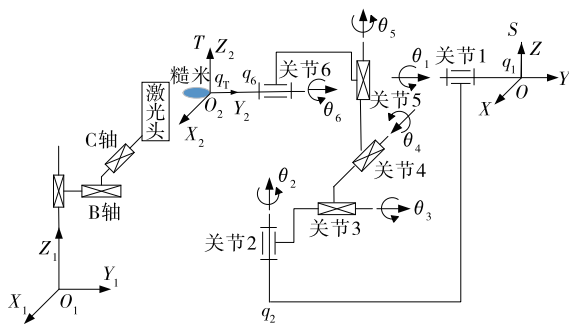


图 4 机械系统运动原理图

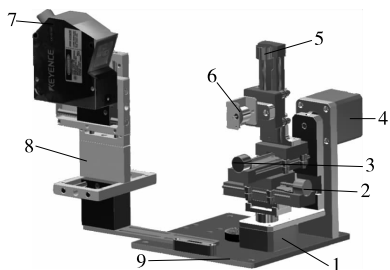
Figure 4 Movement schematic diagram of mechanical system

- $\xi$ ——运动旋量；
- $\theta$ ——关节变量；
- $i$ ——关节序号,  $i=1,2,3,4,5$ ；
- $g_{st}(0)$ ——初态位姿。

糙米扫描设备如图 5 所示,由激光传感器调整座、机架、糙米位置调整模块 3 部分构成。激光传感器调整座包括激光测量头 7、三轴移动调整架 8,用于调整激光测量头的位置配合糙米测量。机架 9 连接激光传感器调整座与糙米位置调整模块,起支撑固定作用。糙米位置调整模块包括绕 Z 轴旋转的步进电机 1(Stepper5)、沿 X 轴方向的移动模块 2(Stepper1)、沿 Y 轴方向的移动模块 3(Stepper2)、绕 Y 轴旋转电机 4(Stepper6)、沿 Z 轴方向的移动模块 5(Stepper3)、糙米固定及回转模块 6(Stepper4),可实现糙米垂直三轴移动、两轴转动运动。

2.4 测控系统设计及标定

2.4.1 测量系统资源需求及设计 测量系统硬件构成如图 3 所示。由核心测量器件 LK-G150 激光位移检测头及其配套控制系统 LK-G3001 构成测量模组,操控、采集点云数据存储由上位 PC 完成。KEYENCE LK-G150 感测



- 1. 绕 Z 轴旋转步进电机 2. 沿 X 轴移动模块 3. 沿 Y 轴移动模块 4. 绕 Y 轴旋转电机 5. 绕 Z 轴移动模块 6. 糙米旋转电机 7. 激光位移传感器 8. 激光位移传感器  $X_1Y_1Z_1O_1$  调整机座 9. 机架

图 5 激光扫描糙米轮廓检测装置原理图

Figure 5 Schematic diagram of the laser scanning brown rice contour detection device

头可检测不透明或半透明材料,漫反射模式下测量的参考距离为 150 mm,镜面反射模式下测量的参考距离为 147.5 mm,参考距离下光点直径约 120  $\mu\text{m}$ ,再现性达 0.1  $\mu\text{m}$ ,重复精度达 0.5  $\mu\text{m}$ ,采样周期可在等级 20/50/100/200/1 000  $\mu\text{s}$  中选择,每次采样数据存储量为 65 536 个点。其性能完全满足测量要求。

2.4.2 嵌入式控制系统设计开发 机械系统的运动控制通过嵌入式控制系统实现,主芯片选用 STM32F429 核心芯片。通过人机界面(HMI)实现 6 个步进电机控制以及 6 个初始复位光电传感器 I/O 接口通讯。控制步进电机发送高速脉冲、方向控制各需 6 个 I/O 接口,公共使能需 1 个 I/O 接口。PC 机实现激光传感器扫描数据采集及控制。

嵌入式芯片硬件需求 IO 资源分配见表 1。共需 30 个通用输入输出接口,STM32F429 有 110 个 IO 接口,且有 4.3 寸 RGB 屏可以支持设计独立的人机交互界面,符合设计需求。

表 1 控制器 IO 分配

Table 1 Controller IO allocation

名称	PULSE	DIR	ENA	LIMIT
Stepper1	PB3	PB4	PF7	PE2
Stepper2	PB5	PB6	PF7	PE3
Stepper3	PB7	PB8	PF8	PE4
Stepper4	PB1	PB0	PF9	PE5
Stepper5	PB2	PB5	PF9	PE6
Stepper6	PA4	PA0	PF9	PI8

3 测量试验

3.1 标定试验

标定包含三轴直线位移限位开关重复定位精度标定和直线位移精度标定。位移驱动选用光驱驱动精密微型步进电机固件套装。行程  $S=40\text{ mm}$ ,步距角  $\beta=18^\circ$ ,丝杠螺距  $t=3\text{ mm}$ ,单相绕组阻抗 9.8  $\Omega$ ,水平驱动载荷  $\geq 2\text{ kg}$ 。驱动模块核心芯片为 A4988,具备 16 细分。理论分辨率为每个脉冲位移 9.4  $\mu\text{m}$ 。标定传感器选用基恩士 LK-G150 激光位移传感器<sup>[13-14]</sup>。

开环条件下系统运动模块选用光欧姆龙 EE-SX674WR 型光电开关作为运动参考点。往复 20 次操作记录滑台停止位置,以其中第 1 次位置数据为基准,测得其重复定位的误差如图 6 所示。其重复定位误差为 0.002~ -0.004 mm,均值为 -0.001 79 mm,方差为 0.001 45,满足系统重复精度要求。

对位移模块全行程运动检测标定,微型位移模块运动精度因采用步进电动机驱动对转速敏感,故设计 9 个转速(600.00,480.00,350.00,224.00,187.50,156.25,

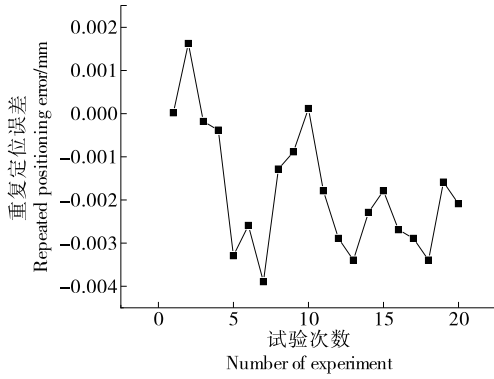


图6 重复定位误差

Figure 6 Repeated positioning error

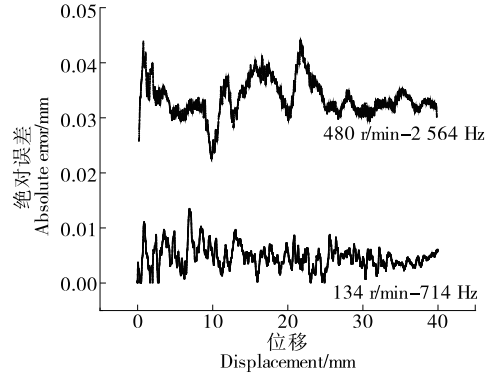


图8 系统运动误差

Figure 8 System motion error

134.00, 114.50, 110.00 r/min)进行测试。转速在350.00 r/min以上激光传感器采样周期为1 ms,其余为2 ms。图7为9个转速下系统最大误差曲线。由图7可知,总体运动误差与驱动频率正相关,斜率为 $6E-06$ ,在低频段(1 kHz以下),相对误差 $<0.010\%$ ;在610 Hz(转速134.00 r/min)时存在一个谷点。600.00 r/min时相对误差为0.049%,均方差为0.012,故运动模块系统综合误差均能满足要求。

系统误差在转速为134.00 r/min时最小,为0.00670 mm;转速为480.00 r/min时最大,为0.02193 mm。图8为对应两转速下的位移-绝对误差曲线。由图8可知,此频段内任意转速皆满足系统准确性要求。

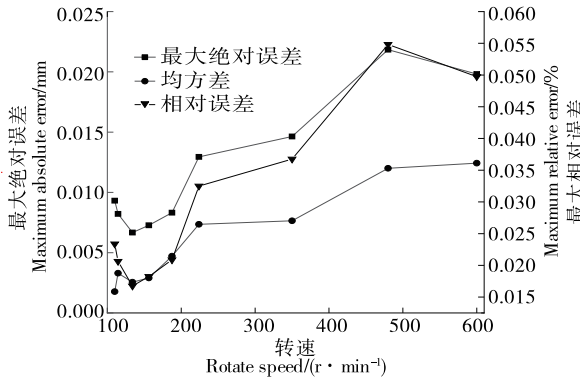


图7 绝对误差/相对误差/均方差-转速曲线

Figure 7 Absolute error/relative error/mean square error-speed curve

故系统确定位移模块步进电动机运动控制参数:步进电动机转速 $n=134$  r/min;驱动控制频率 $f=714$  Hz,16细分,驱动电压12 V,驱动电流0.25 A。

### 3.2 测量试验

在标定基础上使用糙米激光扫描机电系统完成糙米轮廓典型部位扫描检测,获得糙米底部、中段和胚芽端3个截面离散、连续扫描数据及胚芽主截面直线扫描数据。

试验参数设定:① 环形离散扫描。激光传感器采样时间间隔 $20\ \mu\text{m}$ ,每次采样100个数据,取平均值;Y轴分度为 $320\ \text{r}^{-1}$ 。② 环形连续扫描。激光传感器采样时间间隔 $50\ \mu\text{m}$ ,采满65 536个点,Y轴步进电动机参数设定50 r/min。③ 胚芽主截面直线离散扫描。采样时间间隔 $50\ \mu\text{m}$ ,每次采样100个点,取平均值,竖直扫描位移间隔0.01 mm。

糙米底部、中段和胚芽端3个典型截面离散、连续扫描数据如图9所示,表2为其相关性分析及误差分析。由表2可知,糙米底部、中段和胚芽端3个截面相关系数分别为0.992 3,0.982 3,0.984 0。三截面分度离散测量最大绝对误差极坐标为 $D_F(1.070\ 68, 139.500\ 0)$ 、 $Z_F(1.084\ 88, 32.625\ 0)$ 和 $P_F(0.798\ 75, 182.803\ 7)$ ,连续测量极坐标为 $D_L(0.978\ 64, 139.500\ 0)$ 、 $Z_L(0.953\ 07, 32.625\ 0)$ 和 $P_L(0.745\ 22, 182.803\ 7)$ 。对应最大绝对误差分别为 $\Delta D_{FL} = |D_{\rho F} D_{\rho L}| = |1.070\ 68 - 0.978\ 640| = 0.092\ 04\ \text{mm}$ ,  $\Delta Z_{FL} = 0.101\ 81\ \text{mm}$ ,  $\Delta P_{FL} = 0.074\ 86\ \text{mm}$ ,

表2 分度扫描与连续扫描截面相关分析表

Table 2 Indexing scan and continuous scan cross section correlation analysis table

部位	相关系数	绝对误差最大值点			绝对误差		
		分度极径/mm	连续极径/mm	相角/ $^\circ$	均值/mm	最小值/mm	标准差
底部	0.992 3	1.070 68	0.978 64	139.500 00	0.016 70	2.0E-05	0.017 70
中部	0.982 3	1.084 88	0.953 07	32.625 00	0.031 15	5.8E-04	0.021 63
胚芽	0.984 0	0.798 75	0.723 89	182.803 74	0.019 82	5.2E-05	0.016 52

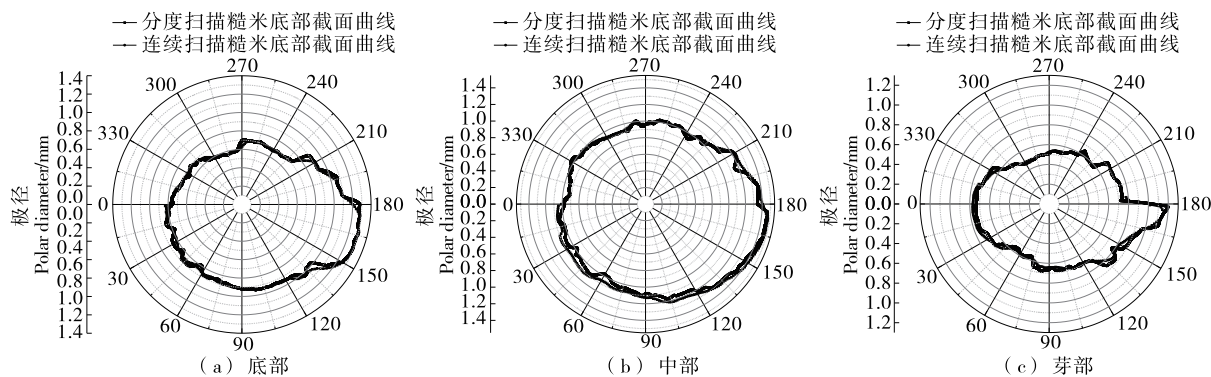


图 9 糙米离散、连续扫描截面图

Figure 9 Scanning cross section of brown rice

最大相对误差分别为  $\delta_D = \Delta D_{FL}/D_{pF} = 0.092\ 04/1.070\ 680 = 8.596\ 41\%$ ,  $\delta_Z = \Delta Z_{FL}/Z_{pF} = 0.101\ 81/1.084\ 88 = 9.384\ 37\%$ ,  $\delta_P = \Delta P_{FL}/P_{pF} = 0.074\ 86/0.745\ 220 = 9.372\ 28\%$ 。说明试验装置连续扫描结果与离散扫描结果具有一致性,且误差满足要求。

初步获得糙米胚芽部分直线扫描曲线(图 10),胚芽截面呈“山”字形,用 5 个特征点(见表 3)初步描述如下:  
 $P_{C1}(0.081, 0.966)$ 、 $P_{C2}(1.572, 0.721)$  两点为胚芽与椭球米体交点坐标,胚芽宽度  $\Delta P_{C12} = |P_{C1X} - P_{C2X}| = |0.081 - 1.572| = 1.491\ \text{mm}$ ;  $P_{G1}(0.513, 0.636)$ 、 $P_{G2}(1.042, 0.697)$  为胚芽谷点,谷间距  $\Delta P_{G12} = |P_{G1X} - P_{G2X}| = |0.513 - 1.042| = 0.529\ \text{mm}$ ;  $P_F(0.757, 1.009)$  为胚芽峰点,峰谷差为  $\Delta P_{FG1} = |P_{G1Y} - P_{FY}| = |0.636 - 1.009| = 0.373\ \text{mm}$ ,  $\Delta P_{FG2} = |P_{G2Y} - P_{FY}| = |0.697 - 1.009| = 0.312\ \text{mm}$ 。

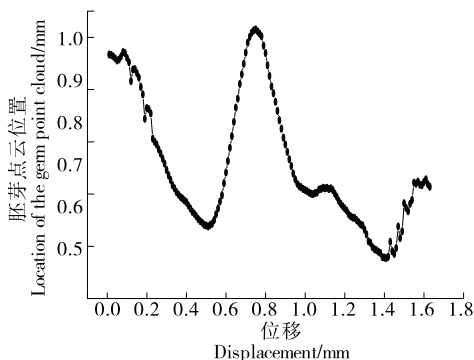


图 10 胚芽离散直线扫描曲线

Figure 10 Discrete linear scanning curve of embryo

表 3 胚芽截面离散直线扫描特征点

Table 3 Feature points of discrete linear scan of germ section mm

特征点坐标	边界 1	谷 1	峰	谷 2	边界 2
位移	0.081	0.513	0.757	1.042	1.572
点距	0.966	0.636	1.009	0.697	0.721

## 4 结论

依据糙米几何特征开发了糙米轮廓激光扫描机电系统,其中机械部分由三轴直角坐标系和两轴旋转坐标系构成,此外一旋转轴用于完成糙米绕椭球长轴旋转获得其环形扫描轮廓点云数据。结果表明,通过离散和连续环形扫描两种方式获取糙米典型截面点云数据,即糙米底部、中部和胚芽部,其测量结果具有一致性,精度满足要求。对胚芽部分进行主截面直线轨迹离散扫描,初步获取了胚芽截面曲线。后续将在胚芽单主截面扫描基础上进行多截面离散、连续点云数据扫描,提高胚芽部分、进而完善糙米点云轮廓描述精度,为进一步升级该装备扫描路径规划提供依据。

## 参考文献

- [1] YADAV B K, JINDAL V K. Monitoring milling quality of rice by image analysis[J]. Computers & Electronics in Agriculture, 2001, 33(1): 9-33.
- [2] 许俐. 机器视觉测量大米留胚率的研究[J]. 江苏理工大学学报, 1997(6): 8-11.
- [3] 黄星奕, 吴守一. 用神经网络方法进行大米留胚率自动检测的研究[J]. 农业工程学报, 1999, 15(4): 187-191.
- [4] 黄星奕, 吴守一, 方如明, 等. 计算机视觉在大米胚芽识别中的应用[J]. 农业机械学报, 2000, 31(1): 62-65.
- [5] 何超. 留胚米胚芽完整度在线检测方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2018: 47-55.
- [6] ZAREIFOROUGH H, MINAEI S, ALIZADEH M R, et al. A hybrid intelligent approach based on computer vision and fuzzy logic for quality measurement of milled rice[J]. Measurement, 2015, 66: 26-34.
- [7] PEREZ J H, TANAKA F, UCHINO T. Comparative 3D simulation on water absorption and hygroscopic swelling in japonica rice grains under various isothermal soaking conditions[J]. Food Research International, 2011, 44(9): 2 620-2 623.

(下转第 138 页)



图 14 不同表现形式的茶马古道在黑茶包装上的视觉呈现

Figure 14 Visual presentation of different forms of tea-horse ancient road on the packaging of dark tea

## 5 结语

基于文化基因的视域审视两湖茶文化脉络及品牌文化,梳理并归纳了万里茶道两湖地区沿线相关文化基因类别及特征,强化品牌核心价值,将具象和抽象的相关元素进行视觉化提炼与转化,使之更易识别与传播,并通过实际包装案例分析这些文化基因在不同题材中应用的提取路径,赋予茶叶包装更加鲜明的地域基因文化特色和品牌个性,增强产品的文化内涵及附加值,不同于以往传统的题材及视觉传达设计的分析思路,为万里茶道之茶品牌包装设计提供了新的题材视角。

(上接第 112 页)

- [8] PEREZ J H, TANAKA F, UCHINOT. Modeling of mass transfer and initiation of hygroscopically induced cracks in rice grains in a thermally controlled soaking condition: With dependency of diffusion coefficient to moisture content and temperature: A 3D finite element approach[J]. Journal of Food Engineering, 2012, 111(3): 519-527.
- [9] FANT E, CASADY W, GOHD, et al. Grey-scale intensity as a potential measurement for degree of rice milling[J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 1994, 58(2/3): 89-97.
- [10] 刘彩玲, 马拓, 王亚丽, 等. 基于三维激光扫描的水稻种子离散元建模及试验[J]. 农业工程学报, 2016, 32(15): 294.
- [11] 陈晨, 吴崇友, 江涛. 基于逆向工程的水稻精准模型构建及

试验验证[J]. 农机化研究, 2017, 39(10): 46-52.

- [12] 曹鹏, 尹文庆, 吴林华, 等. 基于激光传感器的稻种轮廓形状测量方法研究[J]. 传感器与微系统, 2017, 36(3): 29-32.
- [13] 孔祥亮, 汤晓华, 吴星宇, 等. 激光扫描糙米三维可视化数字建模[J]. 食品与机械, 2017, 33(6): 84-88.
- [14] 郝方涛, 汤晓华, 孔祥亮, 等. 糙米轮廓激光扫描测量系统研究与开发[J]. 中国新技术新产品, 2018(6): 6-9.
- [15] 吴婧, 汤晓华, 杨泗革, 等. 基于激光点云数据的糙米表面三维模型重建[J]. 食品与机械, 2019, 35(12): 19-22, 28.
- [16] 樊强, 陈大为, 习俊通. 高精度激光点扫描三维测量系统及应用[J]. 上海交通大学学报, 2006, 40(2): 227-230.
- [17] 默里. 机器人操作的数学导论[M]. 北京: 机械工业出版社, 1998: 51-53.

(上接第 119 页)

- [11] 吴珍珍. HNBR 及其在汽车传动带中的应用[J]. 橡胶工业, 2002(4): 215-221.
- [12] 胡清明, 郭建华, 曹忠亮, 等. 人字齿同步带完全啮合区理论建模与啮合干涉影响研究[J]. 机械科学与技术, 2017, 36(8): 1 193-1 197.
- [13] 郭建华, 李杉, 胡清明. 结构参数对人字齿同步带应力分布的影响[J]. 机械传动, 2017, 41(7): 22-25, 32.

## 参考文献

- [1] 刘晓航. 安化与羊楼洞: 万里茶道上的两湖茶[J]. 广西职业技术学院学报, 2019(6): 40-43.
- [2] 郎丽娜. 文化基因研究的概念和历史[J]. 广西民族大学学报(哲学社会科学版), 2017(2): 8-12.
- [3] 赵鹤龄, 王军, 袁中金, 等. 文化基因的谱系图构建与传承路径研究: 以古滇国文化基因为例[J]. 现代城市研究, 2014(5): 90-97.
- [4] 王伟伟, 宋贞贞. “丝绸之路”多元文化交融背景下的文创产品设计方法[J]. 湖南包装, 2020, 35(5): 7-11.
- [5] 陈羣, 曹冬, 邹园, 等. 万里茶道湖南资水沿线建筑遗产廊道构建研究[J]. 建筑遗产, 2018(3): 71-77.
- [6] 李博, 韩诗洁, 黄梓茜. 万里茶道湖南段文化线路遗产结构初探[J]. 湖南社会科学, 2016(4): 136-140.
- [7] 张恒. 深度学习视域下湖湘印染艺术的模因溯源[J]. 湖南包装, 2021, 36(1): 7-10.
- [8] 杨硕, 张超, 朱晓君. 基于眼动技术的侗族文化元素包装设计[J]. 食品与机械, 2020, 36(9): 149-154.
- [9] 秦晓楠. 融入地域文化特色的旅游商品包装设计研究[J]. 设计, 2019(5): 136-138.
- [10] 谢琪, 曾嵘. 改革开放以来茶叶包装设计的发展与演变管窥[J]. 湖南包装, 2020, 35(3): 1-6.
- [11] 张大鲁. 多感官设计趋势下的食品包装设计创新[J]. 食品与机械, 2020, 36(7): 122-126.
- [14] 史尧臣, 李占国, 李水清, 等. 汽车同步带传动噪声仿真分析与试验研究[J]. 机械传动, 2016, 40(9): 145-149.
- [15] 李占国, 杨秀光, 汪金芳, 等. 基于 Recurdyn 的摩擦与啮合复合传动 V 带横向振动仿真研究[J]. 机械传动, 2015, 39(7): 154-157.
- [16] 郭建华, 姜洪源, 孟庆鑫, 等. 新型人字齿同步带噪声、振动试验研究[J]. 振动与冲击, 2015, 34(17): 120-123, 141.
- [17] 郭建华, 邵悦, 胡清明, 等. 新型人字齿同步带与带轮结构参数的优化设计[J]. 机械传动, 2018, 42(12): 54-58.