

基于机器视觉的机器人自动酒醅出缸策略

Robot's automatic strategy for fermented grains scooping based on machine vision

田淮锐

田建艳

王素钢

王晓波

TIAN Huairui TIAN Jianyan WANG Sugang WANG Xiaobo

(太原理工大学电气与动力工程学院, 山西 太原 030024)

(College of Electrical and Power Engineering, Taiyuan University of
Technology, Taiyuan, Shanxi 030024, China)

摘要:目的:解决地缸固态发酵工艺酒醅出缸环节自动化水平低、工人劳动强度大等问题。方法:提出一种酒醅取料复合机器人自动酒醅出缸策略,在地缸图像预处理和缸口内点云重建等前期工作基础上,采用点云求异分割算法提取酒醅点云,构建取料平面,并求解取料安全作业距离,设计预设取料点;之后采用像素面元体素法评估预设取料点挖取量,选择最优取料点。结果:基于安全作业距离的取料点规划方法合理,可确保挖斗在不同深度取料平面对缸壁酒醅取料的同时,不与缸壁发生碰撞;自动酒醅出缸策略可以有效减少机器人作业时的取料次数,提高酒醅出缸效率。结论:自动酒醅出缸策略可以有效指导酒醅取料复合机器人实现自动化、智能化的地缸出醅作业。

关键词:地缸;酒醅;取料复合机器人;自动出缸;机器视觉;挖取量

Abstract: Objective: To solve the problems of low level of automation and high labor intensity of workers in the fermented grains discharging process of solid-state fermentation in the ground-pot. **Methods:** An automatic fermented grains scooping strategy for the compound robot for fermented grains scooping was proposed. Based on the pre-processing of the ground-pot image and the reconstruction of the point cloud inside the inner edge, the point cloud segmentation algorithm was used to extract the point cloud of fermented grains. The scooping plane was constructed. The safe working distance for scooping was solved.

Preset scooping points were set. Afterwards, the scooping amount of the preset scooping point was evaluated by the pixel surface element voxel algorithm, to select the optimal scooping point. **Results:** The method of planning the scooping point based on the safe working distance is reasonable, which ensures that the bucket does not collide with the ground-pot wall while scooping fermented grains from the wall at different depths of the scooping plane. The strategy can effectively reduce the number of robot scooping, thereby improving the efficiency of fermented grains scooping. **Conclusion:** The strategy can effectively guide the compound robot to realize the automatic and intelligent fermented grains discharging.

Keywords: ground-pot; fermented grains; scooping compound robot; automatic scooping; machine vision; scooping amount

酒醅出缸是清香型白酒地缸发酵生产的重要环节,大多企业采用人工作业,劳动强度大,自动化程度低,容易散发酒气。目前白酒生产的其他环节已有较多自动化方法与设备^[1-2],但已有的酒醅出缸装置^[3-5],或由于作业方式易损坏地缸;或需事先埋于缸内,影响发酵;或不适用于传统车间改造;各自存在局限性。地缸中酒醅分布不确定,地缸开口小、强度低等因素制约着酒醅出缸自动化。课题组^[6]自主研发了一款专用的酒醅取料复合机器人,在保留地缸发酵传统工艺前提下,机器人实现自动酒醅出缸,为此,亟需设计一种适用于该机器人的自动酒醅出缸策略,其合理性直接影响机器人应用可行性。

目前,很多学者对自动取料进行了研究。Clarke 等^[7]根据挖斗挖取颗粒材料时拾音器收集的碰撞音频估计取料量。Takahashi 等^[8]基于 CNN 预测 RGB-D 图中各区域抓取量及其不确定性,选择最优取料点。Schenck 等^[9]在托盘内颗粒物初始状态已知情况下,根据机械臂

基金项目:山西省重点研发计划项目(编号:202102150401006);
山西省自然科学基金(编号:201901D111092)

作者简介:田淮锐,男,太原理工大学在读硕士研究生。

通信作者:田建艳(1966—),女,太原理工大学教授,博士生导师,
博士。E-mail: tut_tianjy@163.com

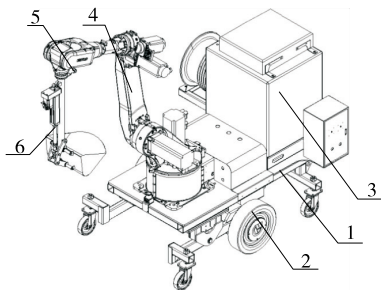
收稿日期:2023-05-17 **改回日期:**2023-09-14

铲斗铲取倾倒动作参数,基于 CNN 预测颗粒物状态。曹小华等^[10]采用三维感知技术重建货船料堆,选择最大抓取量取料点进行取料作业。赵建平等^[11]设计的智能调料机,内置各菜品调料量,实现了烹饪时调料自动精确出料。蔡威^[12]获取垃圾堆表面高度后,根据不同投料口选择取料区域,并以该区域内垃圾堆最高点进行抓取作业。钟星等^[13]使用三次多项式和积分法,在起始点和挖取深度已知条件下,实现了不同挖取量的挖取作业轨迹规划。陆成浩^[14]对船舱散货物料三维重建,采用分层原则逐层取料,且每层以效率最高点进行抓取作业。酒醅取料复合机器人对缸壁区域取料时,要确保不会损坏地缸,并以相对最大挖取量进行取料作业。

试验拟对酒醅取料复合机器人自动酒醅出缸策略进行研究,首先提出一种基于安全作业距离的取料点规划方法,根据地缸内酒醅表面点云构建取料平面,设计预设取料点;然后评估各预设取料点挖取量,选定最优取料点,引导机器人自动化、智能化取料。

1 酒醅取料复合机器人

酒醅取料复合机器人由 AGV、六自由度机械臂和取料装置组成,如图 1 所示。六自由度机械臂装载于 AGV 前方,机械臂末端装载有取料装置和深度相机。



1. AGV 底盘 2. AGV 差分式驱动结构 3. 控制柜 4. 六自由度机械臂 5. 深度相机 6. 取料装置

图 1 酒醅取料复合机器人

Figure 1 Compound robot for fermented grains scooping

取料装置由挖斗、伺服电动缸和连杆组成,连杆安装于机械臂末端,并通过铰链结构连接伺服电动缸和挖斗。通过机械臂第 6 关节旋转角度,控制挖斗取料方向。

地缸开口小、深度深,发酵时埋于地下^[15-16]。为便于酒醅表面数据采集,同时不干扰机械臂取料,选用 Intel RealSense D455 采集地缸中酒醅表面数据,安装于机械臂末端法兰处,设定 RGB 图和深度图采集像素为 $1\,280 \times 720$ 。

为采集缸口内全貌图像,机械臂控制相机移动至地缸口中心正上方 c_h 处,镜头正对缸口平面,设置此位姿为地缸图像采集位姿。综合考虑酒醅取料复合机器人机

械臂作业空间与采集图像中酒醅区域所占比重,设置 c_h 为 $1\,256\text{ mm}$ 。

2 缸口内点云重建

地缸口边缘处灰度图信息会发生跃变,通过边缘检测可对其定位。因此,采用加权平均法^[17]对图 2(a)地缸 RGB 图灰度化,并采用双边滤波^[18]保边降噪后,进行 Canny 边缘检测^[19],结果如图 2(b)所示。

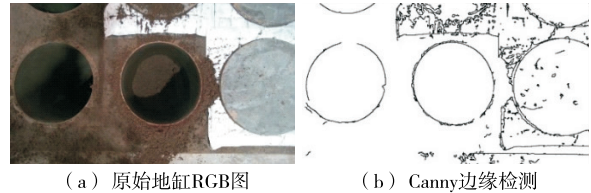


图 2 地缸图像 Canny 边缘检测结果

Figure 2 Canny edge detection results of ground-pot image

地缸图像采集位姿下,地缸口内边缘在获取的图像中应为圆形。遍历轮廓并进行椭圆拟合,对各拟合椭圆构建几何约束,如式(1)所示,提取地缸口内边缘近似拟合圆,结果如图 3 所示。

$$\begin{cases} R_{\min} < e_t < R_{\max} \\ K = \frac{e_t}{e_m} < r_{\max} \end{cases} \quad (1)$$

式中:

e_t, e_m ——各拟合椭圆长轴长度和短轴长度,像素;

$R_{\max}, R_{\min}$ ——地缸口内边缘近似拟合圆的高低约束阈值(与相机高度有关),像素;

$r_{\max}$ ——拟合椭圆的长短轴比的约束阈值(与地缸实际形状有关);

K ——拟合椭圆的长短轴比。

实地采集多幅地缸图像,试验确定 $R_{\min} = 368$ 像素、 $R_{\max} = 384$ 像素、 $r_{\max} = 1.08$ 。

由图 3 可知,Canny 边缘检测和几何约束可以剔除无用轮廓和噪声的干扰,提取出地缸口内边缘。

地缸深度图中可能出现深度值为 0 的空洞,影响后续酒醅挖取量评估。空洞点的邻域信息可以反映空洞处深度信息,同时研究对象为缸口内区域,因此,在缸口内



图 3 地缸口内边缘近似拟合圆

Figure 3 Approximate fitting circle of the inner edge of ground-pot rim

点云重建前,对图像中缸口内空洞进行填充,如式(2)所示。

$$p(u, v) = \text{MAX}[N_4(p)]. \quad (2)$$

根据地缸口内边缘近似拟合圆提取结果,制作掩膜分割地缸 RGB 图和深度图,提取缸口内图像,并进行点云重建,结果如图 4 所示。



图 4 缸口内点云

Figure 4 Point cloud inside the inner edge

3 酒醅取料平面构建

缸口内点云包括缸壁点云与酒醅点云,缸壁点云会干扰预设取料点挖掘量评估。因此,需分割提取酒醅点云,构建酒醅取料平面,为设计预设取料点奠定基础。

3.1 酒醅点云提取

酒醅与地缸壁颜色相近,传统图像分割方法难以分割出酒醅图像,重建酒醅点云。基于点云技术进行缸壁点云与酒醅点云分割试验,分别采用欧式聚类分割、区域生长分割等方法进行试验分析,试验发现:① 酒醅表面分布不规则、不确定;② 地缸形状不规则;③ 酒醅与缸壁无明显分界,缸口内点云具有连通性;④ 缸口内点云较密集。因此,常用的点云分割方法难以实现缸壁点云与酒醅点云分割。

点云求异分割算法基于 KD-Tree 近邻搜索算法,以两组点云中各点间距离作为判断准则。地缸埋于地下,其状态不发生变化。因此,可采用点云求异分割算法求解空缸点云与取料前缸口内点云差异,提取酒醅点云。具体步骤为:

步骤 1:采集空缸时地缸 RGB 图和深度图,建立地缸空缸点云模型。

步骤 2:以空缸点云为目标点云,将取料前缸口内点云作为输入点云,采用 KD-Tree 近邻搜索算法,以地缸空缸点云中 p_i 点为目标点,找到缸口内点云中距离 p_i 点最近的点,求解两点间距离。

步骤 3:若两点间距离近似为 0,认为这两点为对应重合点,即缸壁点云,剔除缸口内点云中对应点,最终得到酒醅点云。

以多缸酒醅出缸作业中各次取料前缸口内点云为试验对象,进行点云求异分割试验,部分结果如图 5 所示。

由图 5 可知,点云求异分割可以实现缸壁点云与酒

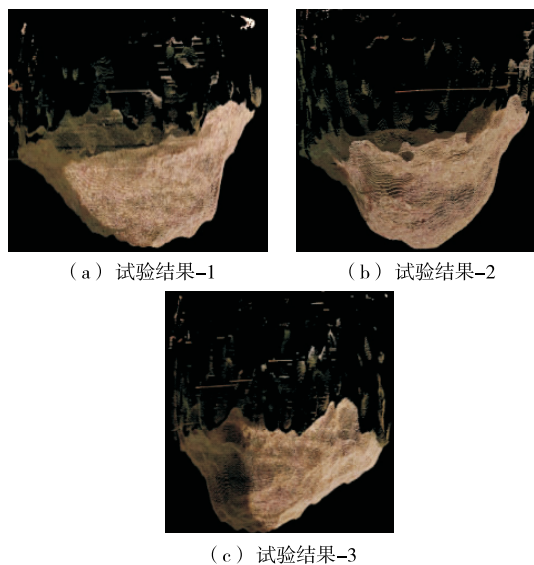


图 5 点云求异分割试验

Figure 5 Point cloud divergence segmentation experiments

醅点云分割。但是由于以下原因:① 同批次制作的不同地缸可能有差异;② 缸壁上可能有少许黏着酒醅;③ 机械臂控制精度不足导致相机各次地缸图像采集位姿可能有差异,点云求异分割算法提取的酒醅点云中可能含有一些离群干扰点。

3.2 构建酒醅取料平面

由于离群干扰点的深度值均小于酒醅主体点云深度值,可通过直方图统计滤除离群干扰点对后续工作的影响。利用直方图统计图 5 各酒醅点云中深度数据,以毫米为单位,组距为 10 mm,结果如图 6 所示,离群点深度数据区间位于直方图左侧区域。

直方图频数最大值 $f_{\max}$ 所在组别的界限,代表了当前时刻酒醅主要深度数据区间,离群点在酒醅点云中占比很小,其所在直方图组别的频数较小。因此,保留频数大于 $1/a$ 直方图频数最大值的组别内深度数据,作为酒醅主体点云数据。结合图 6 分析不同 a 下离群干扰点影响的去除结果,选择 $a=4$ 。

根据当前时刻酒醅主体点云深度数据,以其平均值估计此时酒醅料位深度 d_f ,如式(3)所示,以此深度构建取料平面, d_f 为取料平面和相机平面间距离。

$$d_f = \frac{\sum_A \sum_{i=1}^{f_k} b_{ki}}{\sum_A f_k}, \quad (3)$$

$$A = \left\{ k \mid f_k > \frac{1}{a} f_{\max}, k = 1, 2, \dots, n_h \right\}, \quad (4)$$

式中:

A ——满足条件的直方图组别 k 的集合;

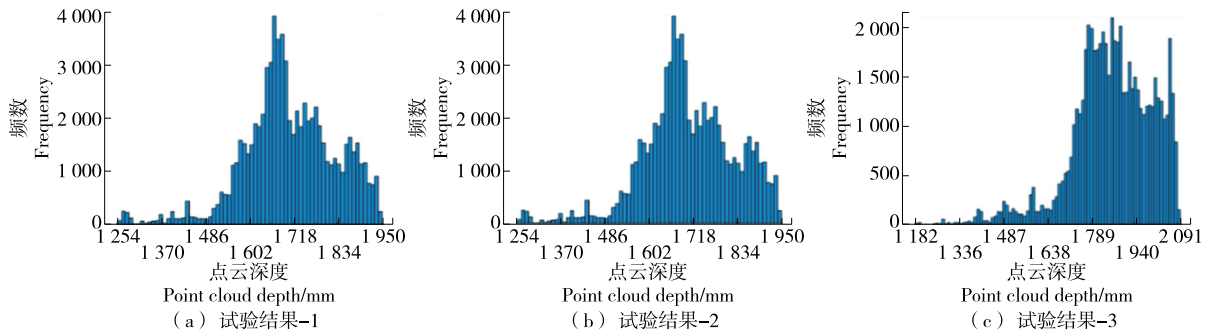


图6 直方图统计结果

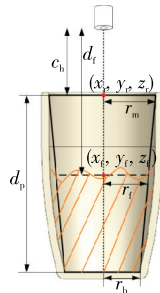
Figure 6 Histogram statistics results

n_h ——直方图组数;

f_k ——直方图中第 k 组的频数;

b_{ki} ——直方图中第 k 组的第 i 个深度数据, mm。

为便于规划,并确保作业时缸壁与挖斗间留有安全裕度,将地缸内部构造视为圆台,以缸口内边缘所围平面为圆台上底面,以缸底为圆台下底面,地缸及构造圆台纵截面如图7所示。



黑色实线为构造圆台纵截面简图

图7 地缸圆台构造

Figure 7 The frustum of a cone structure of ground-pot

酒醅与缸壁间粘连性不强,构造圆台与缸壁间存在较少酒醅时,会自然向下滑落,地缸圆台构造不影响出缸作业。由式(5)计算当前取料平面半径 r_f 。

$$r_f = r_m - \frac{(r_m - r_b)(d_f - c_h)}{d_p}, \quad (5)$$

式中:

r_m ——缸口半径, mm;

r_b ——缸底半径, mm;

d_p ——地缸深度, mm;

c_h ——相机平面和缸口平面间距离, mm。

酒醅余料较少时,若以当前料位深度构建取料平面,挖斗作业中可能与缸底发生碰撞,如图8所示。

根据酒醅料位深度 d_f , 估计料位高度 h_f , 如式(6)所示。当 h_f 低于阈值 t_h 时, 将其判定为尾料, 机器人酒醅出缸进入尾料处理阶段, 以 t_h 对应酒醅料位深度构建取料平面, 并且此阶段中取料平面不再发生变化。若 h_f 小

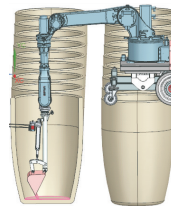


图8 挖斗与缸底碰撞

Figure 8 Collision between bucket and ground-pot bottom

于阈值 t_e , 则认为尾料处理阶段结束。

$$h_f = d_p - d_f + c_h. \quad (6)$$

以挖斗作业不与缸底碰撞为原则, 并留有一定安全裕度 m_s , 确定尾料处理阶段开始对应的阈值 t_h 。根据挖斗翻转取料动作, 若设置取料深度为 d_g , 如图9所示, 依据斗长 l_b 设置 $t_h = l_b - h_g + m_s$ 。

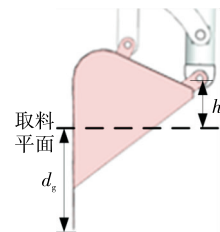


图9 取料深度

Figure 9 Scooping depth

构建酒醅取料平面后, 由第2节地缸口内边缘提取结果, 求解相机坐标系下地缸口圆心坐标 (x_r, y_r, z_r) , 确定取料平面中心坐标 (x_f, y_f, z_f) 。

4 预设取料点设计

机器人作业要求实现对缸壁区域酒醅取料, 同时不损坏地缸。因此, 需要求解取料安全作业距离, 并设计预设取料点。

4.1 取料方向设计

酒醅取料复合机器人取料装置挖斗如图10所示。

机器人自动取放料过程: 首先取料装置到达取料点

上方中间路径点,随后挖斗竖直插入酒醅,翻转进行取料;然后竖直提出取料装置至中间路径点,控制其移动到运料小车上方翻转放料。

挖斗后背为平面型,若挖斗取料方向如图 11(a)中箭头所示,斗背与缸壁间会有较大空隙,缸壁区域会残留较多酒醅,难以向下滑落,后续还需进行处理。挖斗前沿为弧形,可贴合缸壁,实现对缸壁区域取料。因此,设置挖斗翻转取料方向为由取料平面中心朝向缸壁,如图 11(b)中箭头所示。

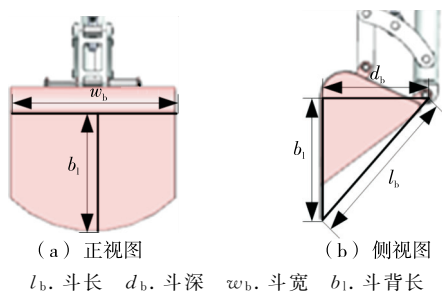


图 10 取料装置

Figure 10 Scooping device

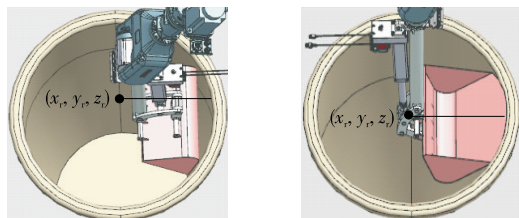


图 11 取料方向设置

Figure 11 Scooping direction setting

4.2 取料安全作业距离

机械臂作业规划需要满足不同深度缸壁区域酒醅取料的可达性^[20]需求。若预设取料点离缸壁太近,挖斗翻转会与缸壁发生碰撞,如图 12 所示,为此需要规划机械臂酒醅取料安全作业距离。

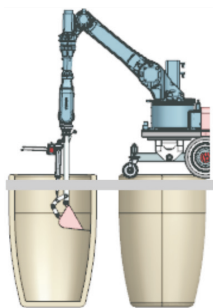


图 12 取料装置与地缸壁碰撞

Figure 12 Collision between scooping device and ground-pot wall

挖斗翻转中前沿动作轨迹恰好不与缸壁交汇,可在挖斗不碰撞缸壁的同时,实现对缸壁区域酒醅安全取料。已将地缸内部视为圆台,取料安全作业距离规划条件为:挖斗翻转中,图 10 中斗长 l_b 标注直线与地缸圆台母线垂直时,挖斗不与缸壁碰撞。因此,以斗长 l_b 为基准,求解取料安全作业距离 e_s ,如式(7)所示,即预设取料点相对于取料平面中心的距离,以取料方向为正方向,确定预设取料点位置。

$$e_s = r_f - l_b / \sin\left(\arctan \frac{d_p}{r_m - r_b}\right). \quad (7)$$

地缸横截面为圆形,预设取料点位于取料平面中以平面中心为圆心,以 $|e_s|$ 为半径的圆上。在不影响作业效率前提下,分析以挖斗开口面覆盖取料平面所需的正投影次数,合理设置预设取料点数目。

通过取料平面中心坐标 (x_f, y_f, z_f) 和取料安全作业距离 e_s ,以预设取料点取料方向为正方向,确定各预设取料点的 (x_g, y_g) 坐标。

4.3 取料深度设计

若取料深度太大,挖料过多,后续动作容易撒料。因此,需要根据不同需求,合理设计取料深度。取料深度可转化为预设取料点距离取料平面的高度 h_g ,若设置取料深度为 d_g ,则 $h_g = b_l - d_g$,如图 9 所示,从而确定各预设取料点的 z_g 坐标。最终得到相机坐标系,即取料前酒醅点云坐标系 O_c 下,预设取料点的三维坐标 (x_g, y_g, z_g) ,记为 $P(x_g, y_g, z_g)$ 。

5 预设取料点酒醅挖取量评估

取料装置的取料轨迹是固定的,每次作业,取料装置的理想取料空间相同,如图 13 中黑色虚线阴影区域所示。

在预设取料点取料时,取料装置相应理想取料空间内酒醅量越多,机器人在该点的挖取量越多。因此,测算预设取料点理想取料空间内酒醅体积,作为预设取料点 $P(x_g, y_g, z_g)$ 的挖取量评估指标。根据前期研究的像素面元体素法,在 $P(x_g, y_g, z_g)$ 相应理想取料空间内,以酒醅点云各点划分面元,作为各酒醅体素底面,再依据挖斗翻转取料前沿动作轨迹和取料前酒醅点云,求解各酒醅

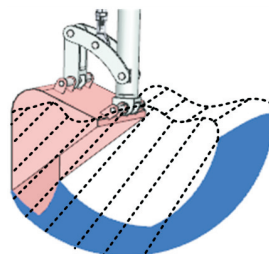


图 13 理想取料空间

Figure 13 Ideal scooping space

体素的高,构建酒醅体素,依次计算各酒醅体素体积,理想取料空间内酒醅体积即为各酒醅体素体积的组合。

5.1 酒醅点云坐标变换

评估预设取料点挖取量的关键是求解挖斗翻转取料前沿动作轨迹函数。因此,基于 ${}^cP(x_g, y_g, z_g)$ 建立理想取料空间坐标系 O_p ,如图14所示,在该坐标系中求解挖斗翻转取料前沿动作轨迹函数。

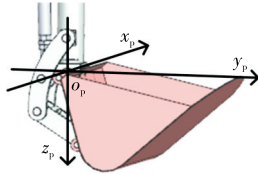


图14 理想取料空间坐标系

Figure 14 Ideal scooping spatial coordinate system

为评估 ${}^cP(x_g, y_g, z_g)$ 挖取量,还需要将酒醅点云和挖斗翻转取料动作中的物理量统一到同一坐标系,为此需要求解取料前酒醅点云坐标系 O_c 和理想取料空间坐标系 O_p 间的变换关系。 O_c 和 O_p 间的变换是刚体变换,变换关系为:

$$\begin{bmatrix} x_{pi} \\ y_{pi} \\ z_{pi} \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} {}^pR & {}^p t \\ 0^T & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{ci} \\ y_{ci} \\ z_{ci} \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (8)$$

式中:

$[x_{pi}, y_{pi}, z_{pi}]^T$ ——转换到理想取料空间坐标系 O_p

中的酒醅点云数据;

$[x_{ci}, y_{ci}, z_{ci}]^T$ ——原始酒醅点云数据。

5.2 预设取料点酒醅挖取量评估指标计算

挖斗翻转取料动作可以视为一个面作用于酒醅的过程,即挖斗翻转取料作用面。挖斗绕连接点做旋转运动,挖斗翻转取料作用面可以视为挖斗在挖斗开口面上的正投影,如图15中黑色虚线阴影所示。

挖斗翻转取料前沿动作轨迹为翻转取料作用面前沿曲线上各点动作轨迹的组合。挖斗翻转至水平过程中,挖斗翻转取料作用面前沿曲线上各点动作轨迹均为圆的

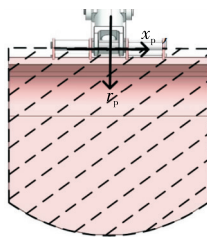


图15 挖斗翻转取料作用面

Figure 15 The action surface of the bucket overturning to scoop

一部分,各点与翻转轴线的垂直距离为各点动作轨迹半径。

为求解挖斗翻转取料作用面前沿曲线上各点动作轨迹半径,如图15所示,在挖斗翻转取料作用面上建立挖斗翻转取料作用面前沿曲线坐标系。根据挖斗尺寸参数,设置 x_p 轴方向上正负坐标极限距离均为 $w_b/2$ 。

挖斗前沿曲线如图16中黑色加粗曲线所示,长度为 l_c ,为半径为 r_c 的圆的一部分。由正投影法可知,挖斗前沿曲线所在圆形在开口面上的正投影为椭圆。根据挖斗尺寸参数计算挖斗背与开口面的夹角 φ ,挖斗前沿曲线所在圆形在开口面上的正投影椭圆长半轴为 r_c ,短半轴为圆半径的正投影长度 $r_c \cos \varphi$ 。正投影椭圆圆心在挖斗翻转取料作用面前沿曲线坐标系 r_p 轴上,其到坐标系原点的距离为 $l_b - r_c \cos \varphi$ 。挖斗翻转取料作用面前沿曲线为挖斗前沿曲线在开口面上的正投影,其函数表达式如式(9)所示。

$$r_p = \sqrt{\left(1 - \frac{x_p^2}{r_c^2}\right)(r_c \cos \varphi)^2} + l_b - r_c \cos \varphi, \quad \frac{1}{2} w_b \leq x_p \leq \frac{1}{2} w_b. \quad (9)$$

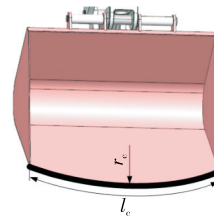


图16 挖斗前沿曲线

Figure 16 Front curve of bucket

将理想取料空间坐标系中酒醅点云各点坐标 x_p 代入式(9),计算挖斗翻转取料作用面前沿曲线上各点动作轨迹半径。在坐标系 O_p 中,挖斗翻转取料作用面前沿曲线上各点动作轨迹组合如式(10)所示,即为挖斗前沿动作轨迹。酒醅点云各点与挖斗前沿动作轨迹上各点在 z 轴方向上具有一一对应关系,对应点的 (x_p, y_p) 坐标相同。分析挖斗翻转取料作用面参数,设置 y_p 轴方向上正坐标极限距离为挖斗翻转取料作用面前沿曲线上各点动作轨迹半径 r_{pj} ,负坐标极限距离均为斗深 d_b 。

$$\begin{cases} (x_p - x_{pj})^2 + y_p^2 + z_p'^2 = r_{pj}^2 \\ \vec{r} \cdot \vec{n} = (x_p - x_{pj}, y_p, z_p') \cdot (1, 0, 0) = 0 \end{cases}, \quad (10)$$

式中:

$\vec{r}$ ——挖斗翻转取料作用面前沿曲线上各点动作轨迹所在圆的圆心指向轨迹上一点的向量;

$\vec{n}$ ——理想取料空间坐标系 yOz 平面法向量;

z_p' —— ${}^cP(x_g, y_g, z_g)$ 理想取料空间内,酒醅点云各点的 (x_{pj}, y_{pj}) 坐标在 z 轴方向上,于挖斗前沿动作轨迹

上对应点的 z_p 轴坐标值;

$[x_{pj}, y_{pj}, z_{pj}]^T$ ——酒醅点云在 $P(x_g, y_g, z_g)$ 理想取料空间内各点。

通过式(11)约束条件提取得到 $[x_{pj}, y_{pj}, z_{pj}]^T$ 。

$$\begin{cases} -\frac{1}{2}w_b \leq x_{pj} \leq \frac{1}{2}w_b \\ -d_b \leq y_{pj} \leq r_{pj} \end{cases} \quad (11)$$

根据式(8)、式(10)和式(11)结果求解 $cP(x_g, y_g, z_g)$ 理想取料空间内各酒醅体素的高度 h_{di} ,如式(12)所示。

$$h_{pj} = z'_{pj} - z_{pj} \circ \quad (12)$$

若 $h_{pj} < 0$, 代表挖斗无法对面元 j 处取料, 则舍弃。

以各个酒酯体素为独立计算单元,求解 $P(x_g, y_g, z_g)$ 理想取料空间内酒酯体积 V_g ,作为该预设取料点挖取量评估指标,如式(13)所示。

$$V_g = \sum_{j=1}^m s_{vj} \times h_{vj} = \sum_{j=1}^m \frac{d_j}{f^x} \times \frac{d_j}{f^y} \times (z'_{vj} - z_{vj}) , \quad (13)$$

式中:

$m \xrightarrow{c} P(x_g, y_g, z_g)$ 理想取料空间内酒醅体素

s_{pi} ——酒醅体素底面积, mm^2 ;

d_j ——面元 j 处相机采集的深度数据, mm。

分别求解各预设取料点 $P(x_{gi}, y_{gi}, z_{gi})$ 挖取量评估指标 V_{gi} , 对比择优, 如式(14)所示, 选择最优取料点, 记为 $P(x_{g0}, y_{g0}, z_{g0})$, 取料方向为取料平面中心与该点连线上指向缸壁方向。

$${}^cP(x_{g^0}, y_{g^0}, z_{g^0}) = \{ {}^cP(x_{g_i}, y_{g_i}, z_{g_i}) : \text{MAX}_{i=1,2,\dots,n_g} (V_{g_i}) \}, \quad (14)$$

式中:

n_g ——预设取料点个数。

6 试验与结果分析

6.1 预设取料点设计试验

虚拟调试技术可以对设计思路全面仿真,降低研发风险^[21]。在山西某清香型酒厂酒醅发酵车间与发酵地缸的1:1测绘模型上,基于NX MCD搭建酒醅取料复合机器人虚拟调试平台,如图17所示。

对酒醅取料复合机器人 3D 模型进行功能属性定义,并创建酒醅取料复合机器人出醅作业仿真序列,最大程度模拟地缸出醅现场机器人作业环境。同时,对挖斗尺寸参数进行分析测量,如表 1 所示。

以缸底极限位置为分析对象,由挖斗翻转取料轨迹可知,此时预设取料点距离缸底高度为 334.30 mm,求解预设取料点坐标,并在虚拟调试平台中进行机器人取料仿真试验。由仿真试验可知,以缸底极限位置为分析对象,取料装置竖直插入以及挖斗翻转过程中,不会与地缸

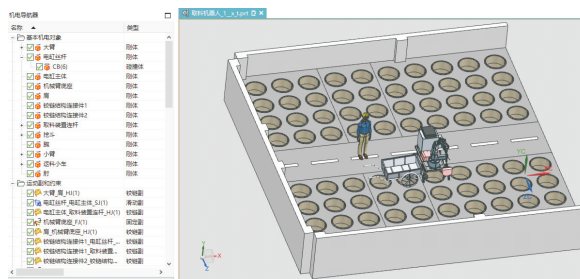


图 17 酒醅取料复合机器人虚拟调试平台

Figure 17 Virtual debugging platform for compound robot for fermented grains scooping

表 1 挖斗尺寸参数

Table 1 Bucket size parameters

参数名称	内部尺寸/mm	外部尺寸/mm
斗长 l_b	333.33	334.30
斗深 d_b	215.31	216.82
斗宽 w_b	347.00	350.00
斗背长 b_1	252.66	/

碰撞。因此,取料装置竖直插入地缸过程中,不会与地缸碰撞,不需考虑约束条件。

为验证基于安全作业距离的取料点规划方法的有效性,基于酒酩取料复合机器人虚拟调试平台,在地缸不同深度处,构建取料平面,对基于安全作业距离的取料点规划方法进行大量仿真测试,部分测试结果如表2所示。

由表 2 可知,基于安全作业距离的取料点规划方法可以确保取料装置在不同深度取料平面,成功对缸壁区域取料的同时,不与缸壁碰撞,并留有一定安全裕度。

地缸缸口内直径为 700 mm,缸底内直径为 500 mm, d_p 为 1 135 mm。对地缸各深度横截面与挖斗开口面进行计算与试验发现,当设计 4 个预设取料点时,可实现取料平面的全覆盖作业;若设计 5 个预设取料点则会有较

表 2 基于安全作业距离的取料点规划方法测试结果

Table 2 Test results of scooping point planning method based on safe working distance

取料平面深度 d_t/mm	取料平面半径 r_t/mm	安全作业距离 e_s/mm	挖斗前沿中点离缸壁距离 d_m/mm
1 356.00	341.18	5.76	10.20
1 456.00	332.37	-3.05	18.98
1 556.00	323.56	-11.86	27.74
1 656.00	314.75	-20.67	36.07
1 756.00	305.94	-29.48	41.23
1 856.00	297.13	-38.29	42.66
1 956.00	288.32	-47.10	40.48
2 056.00	279.51	-55.91	34.73

大重合区域,不符合工程实际。因此,在各酒醅取料平面上均设计4个预设取料点。

6.2 自动酒醅出缸策略试验

研究初期将地缸口圆心酒醅表面深度视为当前料位深度,构建取料平面,设计预设取料点,机器人对各预设取料点依次取料。缸口圆心对应料位一般为酒醅分布最低点,以该深度定义取料平面进行取料,缸壁区域酒醅滑落严重,挖斗翻转与竖直提升阻力增大,可能出现报警现象。因此,自动酒醅出缸策略基于酒醅点云密集的深度

区间构建取料平面。同时,随着酒醅料位变低,取料平面上各预设取料点取料区域会有重合,且料位越低重合区域越大,对所有预设取料点依次取料可能出现某次作业取料量较少的现象。

为验证自动酒醅出缸策略的有效性,在完成虚拟调试的基础上,于山西某清香型酒厂发酵车间进行大量现场试验。由于篇幅所限,仅给出三缸酒醅出缸试验结果,如表3~表5所示。试验中,设置 d_g 为252 mm、 m_s 为10 mm、 t_h 为343.64 mm、 t_e 为110 mm。为进行对比试

表3 采用自动酒醅出缸策略的地缸1取料试验

Table 3 Scooping experiment of ground-pot NO.1 with automatic fermented grains scooping strategy

取料次数	预设取料点1	预设取料点2	预设取料点3	预设取料点4	实际挖取 质量 M/kg
	评估指标 V_{g1}/dm^3	评估指标 V_{g2}/dm^3	评估指标 V_{g3}/dm^3	评估指标 V_{g4}/dm^3	
1	40.35	43.28	45.27	44.67	10.30
2	41.56	39.35	41.73	48.68	11.37
3	40.23	44.39	41.95	45.00	10.01
4	46.30	40.50	38.20	43.91	10.21
5	46.85	43.79	38.94	39.05	10.36
6	41.64	38.37	45.38	38.11	10.09
7	48.63	45.01	40.61	45.14	11.49
8	47.01	48.10	47.00	47.04	11.19
9	45.49	47.04	44.13	42.34	10.82
10	47.99	41.75	48.44	43.72	11.87
11	48.54	46.28	46.32	44.42	11.19
12	46.37	44.11	38.25	39.85	10.22
13	45.41	48.26	44.54	48.16	11.10
14	42.30	41.01	44.96	47.91	10.89
15	43.48	38.93	46.37	40.00	10.25

表4 采用自动酒醅出缸策略的地缸2取料试验

Table 4 Scooping experiment of ground-pot NO.2 with automatic fermented grains scooping strategy

取料次数	预设取料点1	预设取料点2	预设取料点3	预设取料点4	实际挖取 质量 M/kg
	评估指标 V_{g1}/dm^3	评估指标 V_{g2}/dm^3	评估指标 V_{g3}/dm^3	评估指标 V_{g4}/dm^3	
1	42.72	43.53	44.37	39.99	10.12
2	41.11	48.05	45.61	38.10	11.35
3	39.59	47.05	47.21	48.15	11.68
4	39.92	42.41	45.91	48.83	11.62
5	42.23	43.56	38.23	43.18	10.03
6	47.72	46.70	48.13	41.84	11.55
7	40.75	40.38	39.05	41.24	9.92
8	47.77	39.71	40.51	42.89	10.63
9	48.87	41.29	45.59	42.34	11.24
10	45.38	45.67	48.19	44.22	11.39
11	46.28	44.94	43.23	39.36	10.68
12	45.28	48.03	38.58	38.41	11.26
13	42.44	38.77	44.81	48.69	11.12
14	38.24	46.45	41.03	46.37	10.27
15	41.22	40.87	42.00	47.18	10.59

表 5 未采用自动酒醅出缸策略的地缸 3 取料试验
Table 5 Scooping experiment of ground-pot NO. 3 without automatic fermented grains scooping strategy

取料次数	实际挖取 质量 M/kg	取料次数	实际挖取 质量 M/kg
1	9.13	11	8.02
2	9.21	12	10.02
3	9.06	13	9.10
4	8.83	14	9.47
5	9.39	15	8.46
6	8.87	16	8.06
7	9.02	17	8.97
8	9.13	18	8.56
9	8.92	19	8.12
10	8.27		

验,表 5 中机器人作业未采用自动酒醅出缸策略,对所有预设取料点依次取料。现场采用电子台秤对实际挖取质量 M 称重记录。为提高试验对比结果可靠性,三缸醅料均为新填充酒醅发酵原料,地缸中上下层酒醅密度有些微差异。

分析表 3~表 5 可知,在总出醅量近似的情况下,酒醅取料复合机器人采用提出的自动酒醅出缸策略进行酒醅出缸,所需的取料次数明显少于未采用时的取料次数,有效提高了酒醅出缸效率,减少了酒气挥发。自动酒醅出缸策略可有效指导酒醅取料复合机器人自动酒醅出缸作业,能够满足地缸固态发酵车间酒醅出缸环节作业需求。

7 结论

(1) 针对地缸发酵酒醅出缸环节机器人出缸策略进行研究,提出了一种基于机器视觉的自动酒醅出缸策略,并在山西某清香型酒厂酒醅发酵车间进行试验,结果表明:自动酒醅出缸策略有效减少了机器人酒醅出缸作业的取料次数,提高了酒醅出缸效率,实现了地缸出醅作业的自动化、智能化。

(2) 所提出的自动酒醅出缸策略亦可推广应用于其他形状的挖斗或抓斗进行取料作业,首先分析目标料堆及作业环境各种属性,分割提取目标料堆点云;其次根据料堆分布及取料装置作业区域合理预设取料点,并根据作业要求设计取料深度;最后确定取料装置理想取料空间,构建取料装置相应的取料动作轨迹函数,测算预设取料点取料量评估指标,从而选择最优取料点。

参考文献

[1] 庆毅辉,王淑青,张子蓬,等.上甑机器人运动学分析及轨迹研究[J].食品与机械,2020,36(12):70-73.
QING Y H, WANG S Q, ZHANG Z P, et al. Kinematics analysis and trajectory research for upper-retort-robot[J]. Food & Machinery, 2020, 36(12): 70-73.
[2] 田万春,张贵宇,庾先国,等.基于支持向量机的白酒上甑探汽方法研究[J].食品与机械,2020,36(1):79-83,103.
TIAN W C, ZHANG G Y, TUO X G, et al. Study on steam detection method of Chinese spirits steamer-filling operation based on support vector machine[J]. Food & Machinery, 2020, 36(1): 79-83, 103.
[3] 张广河,张鸿浩,张宏伟.一种酒醅出窖装置:CN213596246U[P]. 2021-07-02.
ZHANG G H, ZHANG H H, ZHANG H W. A device for fermenting grains to leave pits: CN213596246U[P]. 2021-07-02.
[4] 张五九,韩兴林,郝建秦,等.一种酒醅出醅方法及其出醅装置:CN103361220A[P]. 2013-10-23.
ZHANG W J, HAN X L, HAO J Q, et al. A method for discharging fermenting grains and its discharging device: CN103361220A[P]. 2013-10-23.
[5] 何文浩,宋海涛,宋金连.醅料出缸设备:CN113667555A[P]. 2021-11-19.
HE W H, SONG H T, SONG J L. Equipment for discharging fermenting grains: CN113667555A[P]. 2021-11-19.
[6] 尉小雪,王素钢,王晓宇,等.一种用于地缸发酵工艺的取料复合机器人:CN216328365U[P]. 2022-04-19.
YU X X, WANG S G, WANG X Y, et al. A extracting compound robot for fermentation process in ground-pot: CN216328365U[P]. 2022-04-19.
[7] CLARKE S, RHODES T, ATKESON C G, et al. Learning audio feedback for estimating amount and flow of granular material[C]//LEVINE S, VANHOUCKE V, GOLDBERG K. Proceedings of the 2nd Conference on Robot Learning: Proceedings of Machine Learning Research. Mountain View: PMLR, 2018: 529-550.
[8] TAKAHASHI K, KO W, UMMADISINGU A, et al. Uncertainty-aware self-supervised target-mass grasping of granular foods[C]//HUTCHINSON S, PARK F, LI Z, et al. 2021 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). Xi'an: IEEE, 2021: 2 620-2 626.
[9] SCHENCK C, TOMPSO N J, FOX D, et al. Learning robotic manipulation of granular media[C]//LEVINE S, VANHOUCKE V, GOLDBERG K. Proceedings of the 1st Annual Conference on Robot Learning: Proceedings of Machine Learning Research. Mountain View: PMLR, 2017: 239-248.
[10] 曹小华,胡金涛.基于三维感知技术的卸船机取料点连续自动定位方法[J].武汉理工大学学报(交通科学与工程版),

- 2013, 37(1): 77-81.
- CAO X H, HU J T. Continuous automatic positioning for reclaiming point of grab ship unloader based on 3D perception technology [J]. Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science & Engineering), 2013, 37(1): 77-81.
- [11] 赵建平, 汪永超, 张莹, 等. 智能调料机设计与研究[J]. 食品与机械, 2014, 30(5): 154-157.
- ZHAO J P, WANG Y C, ZHANG Y, et al. Design of automatic seasoning-discharging machine[J]. Food & Machinery, 2014, 30(5): 154-157.
- [12] 蔡威. 全自动垃圾搬运起重机械控制系统的若干关键技术研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2014: 16-26.
- CAI W. Research of key technologies for garbage handling crane's control system[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2014: 16-26.
- [13] 钟星, 邵辉, 叶贤成. 多障碍物环境下挖掘机的连续避障轨迹规划[J]. 计算机工程与科学, 2018, 40(7): 1 310-1 315.
- ZHONG X, SHAO H, YE X C. Trajectory planning with continuous obstacle avoidance for an excavator in multi-obstacle environment[J]. Computer Engineering & Science, 2018, 40(7): 1 310-1 315.
- [14] 陆成浩. 基于双目视觉的智能化抓斗卸船机关键技术研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2020: 44-79.
- LU C H. Research on key technologies of intelligent grab ship unloader based on binocular vision[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2020: 44-79.
- [15] 张鑫. 大曲清香白酒不同发酵容器酿酒情况对比[J]. 酿酒, 2020, 47(1): 77-78.
- ZHANG X. Comparison of Fen flavor liquor making situation in different fermentative vessels [J]. Liquor Making, 2020, 47(1): 77-78.
- [16] 赵景龙, 韩兴林, 杨海存, 等. 清香型大曲白酒地缸发酵机理[J]. 食品与发酵工业, 2013, 39(11): 81-84.
- ZHAO J L, HAN X L, YANG H C, et al. Preliminary research on fermentation mechanization of Fen-flavor's ground-pot[J]. Food and Fermentation Industries, 2013, 39(11): 81-84.
- [17] 李忠虎, 薛婉婷, 吕鑫, 等. 基于图像融合的风电塔筒边缘检测及提取方法[J]. 国外电子测量技术, 2022, 41(3): 90-95.
- LI Z H, XUE W T, LU X, et al. Edge detection and extraction method of wind turbine tower based on image fusion[J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2022, 41(3): 90-95.
- [18] 张苏楠. 生猪异常行为多源监测及其信息融合方法的研究与应用[D]. 太原: 太原理工大学, 2020: 26-29.
- ZHANG S N. Information fusion method research and application on multi-source monitoring of porcine abnormal [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2020: 26-29.
- [19] 王书宇, 田建艳, 蔡文站, 等. 基于孔特征的弱纹理堆叠工件识别[J]. 计算机工程与应用, 2022, 58(3): 282-288.
- WANG S Y, TIAN J Y, CAI W Z, et al. Recognition of stacked texture-less workpieces based on hole features [J]. Computer Engineering and Applications, 2022, 58(3): 282-288.
- [20] KLEFF S, LI N. Robust motion planning in dynamic environments based on sampled-data Hamilton-Jacobi reachability[J]. Robotica, 2020, 38(12): 2 151-2 172.
- [21] RICHARD S, ROMAN R. The role of a behavioural model for the virtual commissioning of robotic manufacturing systems [J]. Research Papers Faculty of Materials Science and Technology Slovak University of Technology, 2022, 30(50): 45-52.
-
- (上接第 99 页)
- [12] 陈琼, 王子威, 辛博, 等. 微生物法测定特殊食品中叶酸含量的研究[J]. 食品科技, 2023, 48(1): 240-245.
- CHENG Q, WANG Z W, XIN B, et al. Determination of folate content in special foods by microbial method[J]. Food Science and Technology, 2023, 48(1): 240-245.
- [13] 张慧, 吴环, 黄伟乾, 等. 微生物法快速检测婴幼儿配方乳粉中叶酸含量[J]. 食品研究与开发, 2015, 36(5): 66-69.
- ZAHNG H, WU H, HUANG W Q, et al. Rapid microbiological methods detecting the content of folic acid in infant formula milk powder[J]. Food Research and Development, 2015, 36(5): 66-69.
- [14] AMIRAH M G, MATHILDE L, LUDOVIC C, et al. Stability of folic acid under several parameters [J]. European Journal of Pharmaceutical Sciences, 2016, 93: 419-430.
- [15] 翟洪稳, 范素芳, 王娟, 等. 测量不确定度在食品检验中的应用及进展[J]. 食品科学, 2021, 42(5): 314-320.
- ZHAI H W, FANG S F, WANG J, et al. Recent progress in measurement uncertainty and its application in food inspection and detection[J]. Food Science, 2021, 42(5): 314-320.
- [16] 马天菊. 火花源原子发射光谱法测定铸铁中碳的不确定度评定[J]. 冶金分析, 2007(9): 79-82.
- MA T J. Spark source atomic emission spectrometry determination uncertainty evaluation of carbon in cast iron [J]. Metallurgical Analysis, 2007(9): 79-82.
- [17] 田浩, 王志伟, 顾文佳, 等. 微生物法测定食品中叶酸、泛酸、生物素、维生素 B₁₂ 注意事项和实践[J]. 中国标准化, 2018(17): 127-130.
- TIAN H, WANG Z W, GU W J, et al. Matters needing attention and practical experience for microbiological method determination of folic acid, pantothenic acid, biotin and vitamin B₁₂ in foods[J]. China Standardization, 2018(17): 127-130.