

吴尧, 黄峥, 周杰, 等. 基于线激光的穴盘格三维重建与参数提取[J]. 智能计算机与应用, 2024, 14(5): 115–125. DOI: 10.20169/j.issn.2095–2163.240515

## 基于线激光的穴盘格三维重建与参数提取

吴尧, 黄峥, 周杰, 赵明朝, 喻擎苍

(浙江理工大学 计算机科学与技术学院, 杭州 310018)

**摘要:** 现代农业嫁接过程中穴盘参数主要依靠人工输入, 针对现代农业自动化嫁接过程中取苗操作时穴盘参数获取问题, 设计了一种基于线结构光三维扫描终端; 该扫描终端使用 HSV (Hue, Saturation, Value) 阈值处理、连通域提取、基于边缘和灰度融合的亚像素中心线提取等步骤提取激光线条中心线; 提出了一种穴盘格外壁线激光三维扫描和点云数据处理的方法。首先从点云数据中提取出中央穴盘格外壁和穴盘上边沿; 其次, 获取取苗操作时所需要的穴盘的高度、穴盘格下底部直线边长、穴盘格顶开口直线边长、穴盘格下底部曲线边长、穴盘格上开口曲线边长、穴盘壁曲面在不同高度下的三维建模。实验结果表明, 该方法提取出的参数平均误差为 0.68 mm。

**关键词:** 三维重建; 穴盘壁; 穴盘参数; 线结构光; 中心线提取

中图分类号: TP391.41

文献标志码: A

文章编号: 2095–2163(2024)05–0115–11

### 3D reconstruction and parameter extraction of plug grid based on line laser

WU Yao, HUANG Zheng, ZHOU Jie, ZHAO Minglang, YU Qingcang

(School of Computer Science and Technology, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China)

**Abstract:** In the grafting process of modern agriculture, the parameters of the plugs mainly rely on manual input. Aiming at the problem of obtaining the parameters of the plugs during the seedling picking operation in the automatic grafting of modern agriculture, a line laser three-dimensional scanning terminal is designed; the scanning terminal uses HSV threshold processing, connected domain extraction, and sub-pixel centerline extraction based on edge and grayscale fusion to extract the centerline of the laser line; a method for laser three-dimensional scanning and point cloud data processing of the extra wall line of the acupoint is designed. The outer wall of the central tray and the upper edge of the tray are extracted from the cloud data, and then the following parameters are extracted such as the height of the tray, the length of the straight side of the lower bottom of the tray, the length of the straight side of the top opening of the tray, and the side length of the bottom curve under the lattice, the side length of the opening curve of the tray lattice, and the three-dimensional modeling of the curved surface of the tray wall at different heights. The experimental results show that the average error of the parameters extracted by this method is 0.68 mm.

**Key words:** 3D reconstruction; tray wall; plug parameters; line structured light; center line extraction

## 0 引言

在果蔬生产活动中, 穴盘嫁接技术在提高农作物的生长速度、单位产量、抗病能力、减少农药等方面有着积极的作用<sup>[1-2]</sup>。自动嫁接相对于传统人工嫁接方式具有节省人工、全天候运行、提高嫁接效率和嫁接苗成活率等优势<sup>[3-4]</sup>。目前, 国内的自动嫁接机自动化水平较低, 仍以半自动嫁接机为主, 究其原因、主要就是缺少对穴盘苗自动化的取苗操作<sup>[5-6]</sup>。

实现穴盘苗自动化取苗操作的难点在于: 国内各大嫁接基地所使用的穴盘类型不统一, 难以获取穴盘格的参数, 比如: 穴盘的高度、穴盘的开口边长、穴盘壁曲面每一点的位置等, 目前国内外并没有针对穴盘格参数获取的研究; 即使是获取了特定类型的穴盘格的三维参数, 取苗终端的设计, 也是一个难点。

穴盘取苗操作是指将穴盘苗从穴盘格中抓取出来, 分为夹取式、顶出式、顶夹结合式取苗, 在取式中苗铲取苗是目前较为常用的取苗方式<sup>[7-9]</sup>, 本文设

作者简介: 吴尧(1996-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 计算机视觉, 机器人。

通讯作者: 喻擎苍(1969-), 男, 博士, 教授, 硕士生导师, 主要研究方向: 计算机视觉, 计算机控制。Email: qcyu@zstu.edu.cn

收稿日期: 2023–04–15

计的取苗终端如图1所示,在进行取苗操作时需要将苗铲沿着穴盘壁下降到穴盘格底部,从而使得苗铲抱紧生长基质,然后2个苗铲上升完成取苗操作,该取苗方式的优点在于苗铲不会铲断穴盘苗根茎,有利于嫁接苗的存活率。但苗铲紧贴穴盘壁下降的操作,首先需要知道穴盘格的参数,并且苗铲在下降时能够改变旋转角度和两苗铲的间距。

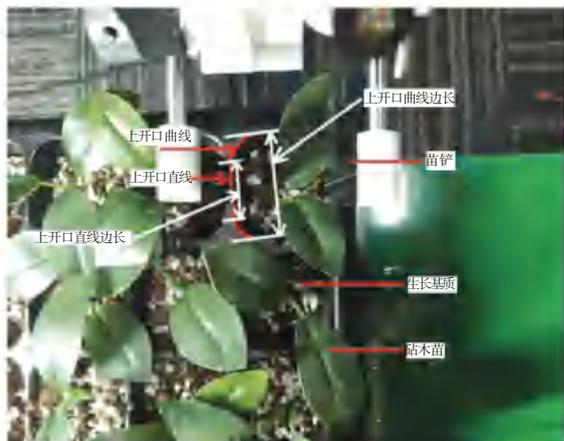


图1 穴盘格取苗

Fig. 1 Take seedlings from plug grid

由于难以获取穴盘格的三维参数,在设计取苗终端时,往往会采取降低取苗终端的自由度,如采用斜向夹片经行穴盘苗的提取,这种方式苗铲只有角度变化这一个自由度,在取苗终端下降时苗铲无法紧贴穴盘壁。因此对穴盘苗根茎的伤害大,并且对不同种类的穴盘的适应性低<sup>[10-11]</sup>。

为了解决自动化嫁接过程中取苗操作时穴盘格参数的获取问题,本文设计了一种基于线激光的视觉采集终端;设计了一个点云数据处理流程进行点云数据处理,该流程包括:使用00激光线条中心线提取流程提取激光中心线,使用点云数据生成流程生成三维点云,使用穴盘格三维重建与参数提取流程进行三维重建与参数提取。本文分别使用大、中、小三种规格的穴盘进行实验,本文方法提取的上开口曲线边长、下底部曲线边长、高度、凹槽间距等穴盘参数,能够满足实际的取苗终端的取苗需求。

## 1 视觉采集终端设计

视觉采集终端由树莓派相机、红色线激光器、旋转装置和树莓派构成。具体地,树莓派相机的焦距为2.8 mm、视场角为90°、CMOS尺寸为0.25英寸、拍摄图片大小为480×640像素、曝光时间为0.099 91 ms。红色线激光器为半导体激光发生器,激光波长为650 nm,运转方式为连续激光器,激光发生器功率为

5 mw。旋转装置使用步进电机控制,步距角为1.8°,16细分,旋转系统旋转范围为90°。

点云数据采集终端如图2所示。由图2可以看到,相机中心线与线激光平面呈45°夹角,旋转装置可以同时旋转相机与线激光以适应不同的扫描任务。为了降低扫描时间,视觉采集终端的相机可以同时拍摄到多个穴盘格外壁,因此相机与穴盘格外壁间需要有特定的距离。经过相机标定与激光平面标定,将相机与线激光发生器之间的距离设定为120 mm。



图2 点云数据采集终端

Fig. 2 Point cloud data acquisition terminal

## 2 激光线条中心线提取流程

### 2.1 激光线条提取与图片分割

图片分割可以在保留图像结构特征信息的同时,又使所要处理的数据量大量减小<sup>[12]</sup>。激光线条提取与图片分割的流程图和运行结果如图3所示。在阈值处理步骤中,将HSV图片的色调 $H \in [320, 360]$ ,明度 $V \in [75, 230]$ 的像素点作为阈值处理的前景点。激光线条细提取的步骤为:首先,将提取出的包围框作为种子包围框,上下左右各扩张一倍;然后,使用Guss模糊平滑该包围框包裹的HSV图片中的V通道区域;接下来,使用 $V \in [55, 230]$ 重新进行阈值处理;最后,对该区域重新进行连通域处理,找出最大的连通域作为最终提取的结果。

### 2.2 激光线条亚像素中心线提取

在使用激光三角法对穴盘进行三维测量时,激光线条中心位置是提高测量精度的关键步骤之一<sup>[13]</sup>。激光线条亚像素中心线提取的流程图和运行结果如图4所示。基于边缘的亚像素中心线提取的步骤为:首先,将激光边缘分为激光上边缘与下边缘,找到上边缘曲线和下边缘曲线<sup>[14]</sup>;然后,将上下

边缘曲线的采样频率增加一倍, 得到新的上边缘亚像素点  $T_i$  和下边缘亚像素点  $B_i$ ; 最后, 边缘亚像素中心线  $EC_i$  可由式(1) 进行描述:

$$EC_i = (T_i + B_i) / 2, i \in [0, 2w] \quad (1)$$

基于灰度重心的亚像素中心线提取的过程为: 将包围框中激光线条从左至右开始遍历激光线条中的每一列, 找出其中的灰度重心点作为激光中心线的像素点<sup>[15-16]</sup>。同样地, 将采样频率增加一倍到基于灰度重心的激光亚像素中心线  $MC_i (i \in [0, 2w])$ 。最终融合的激光中心线的提取步骤为: 将边缘提取出的激光中心线亚像素点  $EC_i$  和最大值提取出来的激光中心线亚像素点  $MC_i$  进行融合, 得到最终的激光中心线亚像素点  $C_i$ , 可由式(2) 来求值:

$$C_i = (EC_i + MC_i) / 2 \quad (2)$$

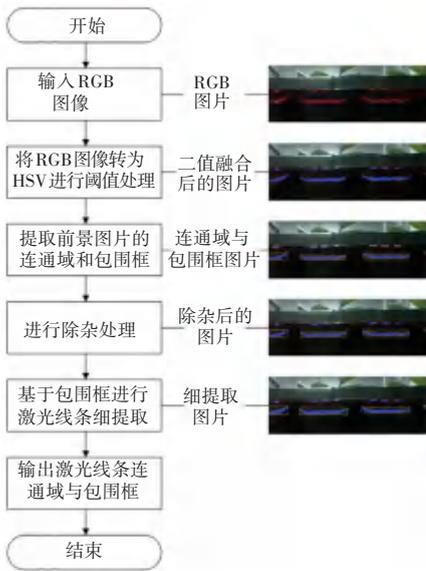


图 3 激光线条提取与图片分割流程

Fig. 3 Flow chart of laser line extraction and image segmentation

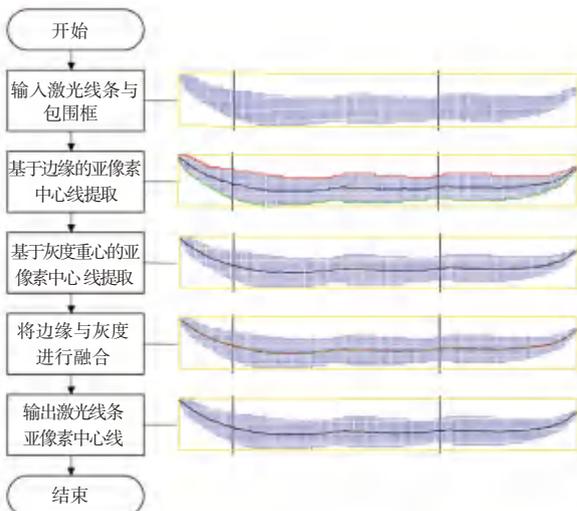


图 4 激光亚像素中心线提取流程

Fig. 4 Flow chart of laser line sub-pixel centerline extraction

### 3 点云数据生成流程

点云数据生成流程是穴盘格三维重建与参数提取流程的基础, 点云数据生成流程如图 5 所示。由图 5 可以看到, 首先控制扫描终端扫描穴盘格外壁, 然后依据相机内参矩阵和激光平面参数生成点云数据并使用包围盒包围每一段连续的激光线条, 接着使用基于包围盒的连通域处理算法提取连通域, 最后使用基于包围盒的点云数据分类算法提取出中央穴盘壁和穴盘上边沿。

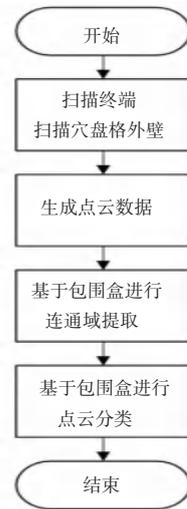


图 5 点云数据生成流程

Fig. 5 Flow chart of point cloud data generation

#### 3.1 终端扫描与点云数据生成

扫描时将穴盘放置在水平面上, 激光平面处于斜向上  $45^\circ$ , 相机正视于穴盘壁, 采集终端向上移动, 每隔 1 mm 采集一张图片。采集终端扫描的 3 个阶段如图 6 所示, 分别是: 开始阶段, 此时激光平面经过穴盘壁底部; 激光线消失阶段, 此时穴盘上边沿会遮挡相机的视线, 导致穴盘壁点云生成不完整; 激光线再次出现阶段, 此时穴盘上边沿不再遮挡相机的视线, 激光平面经过穴盘上边沿。

本文已经使用相机标定得到相机内参矩阵  $k$ , 使用激光平面标定得到激光平面的表示方程为:

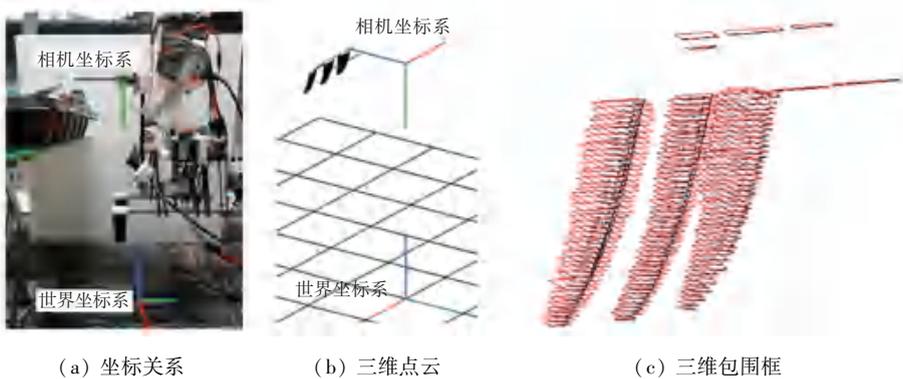
$$AX + BY + CZ + D = 0 \quad (3)$$

将包围框与激光中心线由像素坐标系转移到相机坐标系  $\{c\}$  下, 然后依据从世界坐标系到相机坐标系的坐标变换  ${}^w_c T$  将结果转移到世界坐标系  $\{w\}$  下, 三维点云提取过程如图 7 所示。



图6 完整的扫描过程

Fig. 6 Complete scanning process



(a) 坐标关系

(b) 三维点云

(c) 三维包围框

图7 三维点云提取

Fig. 7 3D point cloud extraction

本文的生成点云 $P$ 除了可以表示每一个点在世界坐标系下的三维坐标信息,更重要的是每一个包围框都包围了一段处于连续状态下的点云线段。为了方便后续处理,使用包围盒 $B = [P_{\min} \ P_{\max}]$ 包裹世界坐标系下的包围框,生成的激光中心线和包围盒的结果如图8所示。



图8 激光中心线和包围盒

Fig. 8 Laser centerline and bounding box

### 3.2 基于包围盒的连通域提取与除杂

传统方法中点云数据的连通域提取主要依靠聚类来实现,包括欧几里得、区域生长、Ransac等方法<sup>[17]</sup>。这类方法的核心思维是点与点之间的距离和阈值 $T$ 作比较,若满足条件则可视作这2个点处于同一个连通域之下。但本文使用聚类进行连通域处理稍显冗余,因为本文在生成激光点云数据 $P$ 的同时还生成了包围连续点云数据的包围盒 $B$ ,那么对于点云数据连通域的提取问题就可以转换为对包围盒的连通域提取问题,而包围盒的数量往往是极小的,小于点云的数量,本文使用了150张图片进行统计,平均单张图片生成3.12个包围框,800.7个亚

像素点,点云数量是包围盒数量的256.6倍。基于包围盒的点云数据连通域提取算法描述如下。

#### 算法1 基于包围盒的点云数据连通域提取算法

输入 全部的包围盒 $B$

输出 全部的连通域存储队列 $S$

1. 使用包围盒 $B$ 初始化二维链表 $L_{i,k}$ ,其中 $i$ 为拍摄顺序, $k$ 为当前拍摄下包围盒由左至右的顺序;
2. 初始化一个连通域存储队列 $S_c$ ,初始化包围盒存储队列 $Q$ ;
3. 遍历二维链表 $L$ ,元素为 $B_{i,k}$ ;
4. 将当前的包围盒 $B_{i,k}$ 存储到队列 $Q$ 中,并且删除 $L$ 中的元 $B_{i,k}$ ;
5. 只要队列 $Q$ 不为空;
6. 取出队列 $Q$ 中的首元素,并将其存储到 $S_c$ 中;
7. 遍历当前位置的上(下)一行链表 $L$ ,元素为 $B_{i-1,m}(B_{i+1,n})$ ;
8. 如果 $B_{i-1,m}(B_{i+1,n})$ 与 $B_{i,k}$ 相交;
9. 将 $B_{i-1,m}(B_{i+1,n})$ 存储到 $Q$ 中,删除 $L$ 下的 $B_{i-1,m}(B_{i+1,n})$ ;
10. 将 $S_c$ 拷贝到队列 $S$ 中,清空 $S_c$ 中全部元素;

表1为本文算法和传统欧氏聚类算法的时间对比。表1中,每种穴盘类型都进行了20次对比试验,其中的时间与点云数量为每种穴盘类型的平均

值,本文提出算法的执行效率是传统欧氏聚类算法的94.4倍。

表 1 本文算法与欧式聚类算法时间对比

Table 1 Time comparison between the algorithm in this paper and the Euclidean clustering algorithm

穴盘类型	本文算法 执行时间/ $\mu\text{s}$	欧式聚类算法 执行时间/ $\mu\text{s}$	点云数量
大	2 271	322 129	42 458
中	1 608	163 066	20 153
小	2 677	133 627	19 289

三维点云连通域处理后的结果如图 9 所示,分类与除杂后中央穴盘壁与穴盘上边沿的结果如图 10 所示,最大的包围盒显示了中央穴盘壁点云,其余部分则是在相机运动过程中遮挡相机视线的穴盘上边沿。



图 9 三维点云连通域

Fig. 9 3D point cloud connected domain

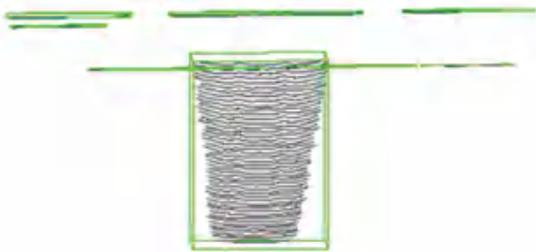


图 10 中央穴盘壁与穴盘上边沿

Fig. 10 Central tray wall and upper edge of tray

#### 4 穴盘格三维重建与参数提取流程

穴盘格三维重建与参数提取流程如图 11 所示。

##### 4.1 穴盘壁高度参数获取和凹槽特征获取与重建

采集终端不能采集完整的穴盘壁,但穴盘壁的高度可由中央穴盘壁与穴盘上边沿的包围盒间接计算,穴盘壁的高度  $H$  为穴盘上边沿包围盒的最高点的高度  $H_T$  减去中央穴盘壁包围盒的最低点高度  $H_B$ 。提取出的上下平面如图 12 所示。图 12 中,蓝(红)色线条是穴盘壁的上顶面(下底面)在世界坐标系中  $y - O_w - z$  平面上的投影。



图 11 穴盘格三维重建与参数提取流程

Fig. 11 3D reconstruction and parameter extraction process of acupoint grid

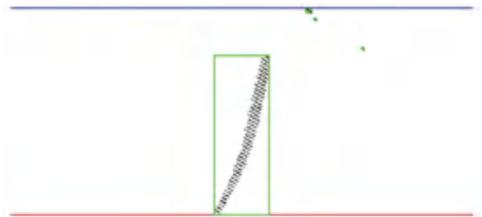


图 12 穴盘壁高度

Fig. 12 Height of the tray wall

常见的不同穴盘的穴盘壁凹槽如图 13 所示,可以发现每一款穴盘的穴盘壁都会存在 2 条相互平行且竖直的凹槽。使用苗铲进行取苗时,苗铲需要紧贴凹槽下降。

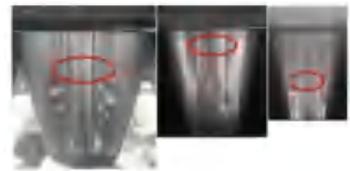
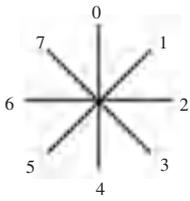


图 13 不同穴盘的穴盘壁凹槽

Fig. 13 Grooves in the tray walls of different trays

凹槽中心线上的一点对应着激光中心线的凸点,使用费里曼链码对激光中心线编码。使用费里曼链码提取凸点如图 14 所示。图 14(a)展示了费里曼链码的编码规则<sup>[18]</sup>,图 14(b)展现了一个激光线条中心线的费里曼链码的提取结果,其费里曼链码为 3332323223223...212211212。找到其中以 1 为起点,以 32 或者 31 为终点的线段,该线段中行下标最低的像素点的重心位置可以看作是一个凸起点。



(a) 编码规则

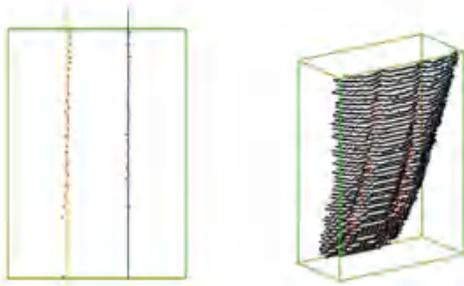


(b) 提取结果

图14 费里曼链码提取凸点

Fig. 14 Freeman chaincode extraction bump

提取的穴盘壁凹槽如图15所示。首先,将凸点由像素坐标系转换到世界坐标系下;根据这些凸点在世界坐标系下的分布将其分成2组;然后,将这些凸点投影到世界坐标系的  $x - O_w - z$  平面下进行直线拟合、除杂、再直线拟合操作得到图15(a)中的拟合直线;接下来,将最终拟合好的2条直线在  $\hat{Y}$  轴上进行升维,将其变为2个平面;参见图15(b),最终的凹槽点为2个平面与点云曲线的交点。



(a) 除杂后的凹槽点 (b) 修正后的凹槽点

图15 提取的穴盘壁凹槽

Fig. 15 Grooves of extracted tray wall

扫描终端不能完整地扫面整个穴盘壁。一些常见的穴盘壁平面特征如图16所示。由图16可以发现穴盘壁靠近凹槽曲线缺失的部分呈现平面特征,该区域的凹槽曲线呈现直线特征,运用下文给出算法提取该直线特征。



图16 穴盘壁平面特征

Fig. 16 Planar features of tray wall

如果在世界坐标系下有一条直线  $L$  通过凸点

${}^w P_0 = [X_0, Y_0, Z_0]$ , 方向向量为  $[I, J, K]$ , 那么直线的对称式方程为:

$$\frac{x - X_0}{A} = \frac{y - Y_0}{B} = \frac{z - Z_0}{C} \quad (4)$$

将上述直线使用式(5)转换为2个分别垂直于  $x - o - z$  和  $y - o - z$  的平面  $F_1, F_2$ :

$$\begin{cases} x = \frac{A}{C}(z - Z_0) + X_0 = az + b \\ y = \frac{B}{C}(z - Z_0) + X_0 = cz + d \end{cases} \quad (5)$$

其中,  $a = \frac{A}{C}; b = X_0 - \frac{A}{C} Z_0; c = \frac{B}{C}; d = Y_0 - \frac{B}{C} Z_0$ 。

由于  $F_1, F_2$  的交线就是直线  $L$ , 那么对空间直线的拟合问题就转换到对这2个平面进行拟合<sup>[19]</sup>。在世界坐标系下有凸点集合  ${}^w P_1, {}^w P_2, \dots, {}^w P_i, \dots, {}^w P_n$ , 这些凸点到  $F_1, F_2$  的距离平方和分别为式(6)和式(7):

$$Q_1 = \sum_{i=1}^n (X_i - a Z_i - b)^2 \quad (6)$$

$$Q_2 = \sum_{i=1}^n (Y_i - c Z_i - d)^2 \quad (7)$$

这是一个典型的最小二乘凸优化问题,对  $a, b, c, d$  分别求导并令其导数为0,即可求出  $Q_1 + Q_2$  的最小值<sup>[20]</sup>:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^n 2(X_i - a Z_i - b) \times Z_i = 0 \\ \sum_{i=1}^n 2(X_i - a Z_i - b) = 0 \\ \sum_{i=1}^n 2(Y_i - c Z_i - d) \times Z_i = 0 \\ \sum_{i=1}^n 2(Y_i - c Z_i - d) = 0 \end{cases} \quad (8)$$

由式(8)化简可得:

$$\begin{aligned} \ddot{a} &= \frac{n \sum_{i=1}^n X_i Z_i - \sum_{i=1}^n X_i \times \sum_{i=1}^n Z_i}{n \sum_{i=1}^n Z_i^2 - \sum_{i=1}^n Z_i \times \sum_{i=1}^n Z_i}, \\ \ddot{b} &= \frac{\sum_{i=1}^n X_i - a \sum_{i=1}^n Z_i}{2}, \\ \ddot{c} &= \frac{n \sum_{i=1}^n Y_i Z_i - \sum_{i=1}^n Y_i \times \sum_{i=1}^n Z_i}{n \sum_{i=1}^n Z_i^2 - \sum_{i=1}^n Z_i \times \sum_{i=1}^n Z_i}, \\ \ddot{d} &= \frac{\sum_{i=1}^n Y_i - c \sum_{i=1}^n Z_i}{2} \end{aligned} \quad (9)$$

现已有2条线段  $Line_{bottom}$ 、 $Line_{top}$ , 令  $z = 0, z = 1$ , 那么  $Line_{bottom}$  过点  $[b_{bottom} \ d_{bottom} \ 0]$ 、 $[(a_{bottom} + b_{bottom}) \ (c_{bottom} + d_{bottom}) \ 1]$ ,  $Line_{top}$  过点  $[b_{top} \ d_{top} \ 0]$ 、 $[(a_{top} + b_{top}) \ (c_{top} + d_{top}) \ 1]$ , 那么2条线段之间的夹角  $\theta$  的余弦值为:

$$\cos \theta = \frac{|a_{bottom} \times a_{top} + c_{bottom} \times c_{top} + 1|}{\sqrt{a_{bottom}^2 + c_{bottom}^2 + 1} \times \sqrt{a_{top}^2 + c_{top}^2 + 1}} \quad (10)$$

综合前文所述凹槽曲线直线提取算法描述如下。

**算法2 凹槽曲线直线提取算法**

输入 左(右)侧凹槽曲线点  ${}^w P_i({}^w Q_i), i \in [0, n]$

输出 左(右)侧的凹槽直线  $L(R)$

1. 令  $begin = 0, end = n, mid = \lfloor (begin + end)/2 \rfloor, minLineLength = 10$ ;  $begin$  和  $end$  分别表示输入凹槽线点的下标
2. 遍历左(右)侧凹槽曲线点  ${}^w P_i({}^w Q_i)$ ;
3. 如果  $begin + minLineLength - 1 \leq end$ ;
4.  $i \in [begin, mid - 1]$  的点使用式(9)求取拟合直线  $L_b$ ;
5.  $i \in [mid, end]$  的点使用式(9)求取拟合的直线  $L_i$ ;
6. 使用式(10)求取  $L_b$  与  $L_i$  之间的夹角  $\theta$  的余弦值;
7. 如果  $\cos \theta > 0.9999$ , 即  $0 \leq \theta < 0.8^\circ$ ;
8.  $i \in [begin, mid - 1]$  的点使用式(9)求取最终拟合直线  $L(R)$ ;
9. 否则;

10. 令  $begin = begin + 1$ , 重新开始遍历;

11. 否则;

$i \in [n - minLineLength + 1, n]$  的点使用式(9)求取最终拟合直线  $L(R)$ ;

穴盘外壁凹槽直线特征的提取结果如图17所示。结合穴盘高度,将图17中的直线向上延长至穴盘上边沿平面即可得到穴盘外壁凹槽直线补齐的结果,直线补齐的结果如图18所示。穴盘外壁凹槽点所形成的曲面如图19所示,该曲面由相邻的3个凹槽点构成的三角面组成。



图17 凹槽直线

Fig. 17 Grooved line

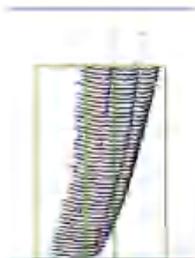


图18 直线补齐

Fig. 18 line completion



图19 凹槽曲面

Fig. 19 Grooved surface

**4.2 穴盘壁上开口和下底面曲线边长的获取**

激光线条曲线的长度存在一定的测量误差,直接使用最下面的一条激光线条曲线来计算穴盘格下底面曲线边长存在十分巨大的误差,本文使用最下面连续3条激光曲线的点云数据的分布来降低测量误差。

随着扫描终端的向上移动,点云数据的分布右移,并且该方向上的点云点的密度高,所以该方向获取的数据误差低。从穴盘壁下底面出发,每一条激光线段定义为  $L_i$ 。求取出  $L_i$  在  $\hat{Y}$  轴上的重心  $Y_i$ , 那么  $L_i$  相对于  $L_{i-1}$  向外扩张的距离为:

$$D_i = Y_i - Y_{i-1} \quad (11)$$

一个穴盘格的4个穴盘壁之间相互对称,那么

$L_i$  相对于  $L_{i-1}$  在  $\hat{X}$  轴方向上的长度差可由式(12)计算:

$$getX(L_i - L_{i-1}) = 2 \times D_i \quad (12)$$

令  $W_i = getX(L_i)$  为  $L_i$  在  $\hat{X}$  轴方向上的长度,穴盘格下底面曲线边长由式(13)可得:

$$LB = (W_1 + W_2 + W_3 - 4 \times D_2 - 2 \times D_3) / 3 \quad (13)$$

穴盘壁上开口的边长可以由底部边长和其凹槽凸点来求取。令  $LT$  是穴盘壁的上开口曲线边长,穴盘壁左右凹槽凸点为  ${}^w P_i, {}^w Q_i$ , 由此推得:

$$LT = LB + getY({}^w P_n + {}^w Q_n - {}^w P_1 - {}^w Q_1) \quad (14)$$

将  $LB$  与  $LT$  所生成的边缘移动到穴盘壁点云的对应位置,结果如图20所示。

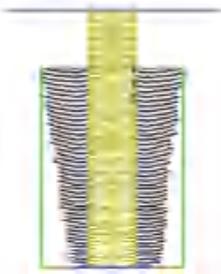


图20 穴盘外壁上下曲线边长

Fig. 20 The side length of the upper and lower curves of the outer wall of the hole plate

### 4.3 穴盘壁不同高度下直线部分的获取

由前文可知穴盘壁呈现曲面特征,而苗铲则是一个平面,由于苗铲在下降过程中需要紧贴穴盘壁,因此需要找出穴盘壁曲面在不同高度下的直线部分。穴盘壁凹槽特征的获取中仅仅找出了穴盘壁曲面在不同高度下中心区域的直线部分,本节需要找出全部的直线部分。穴盘壁凹槽特征的获取已经获取到穴盘壁左右凹槽凸点  ${}^w P_i, {}^w Q_i$ , 令直线  $L_i$  过2点  $[{}^w P_i, {}^w Q_i]$ , 令  $[{}^w P_i, {}^w Q_i]$  所在的激光中心曲线为  $Curve_i$ , 找出  $L_i$  与  $Curve_i$  的2个交点,分别记作  ${}^w L_i$  和  ${}^w R_i$ 。在  $Curve_i$  中的一条直线内的2个凹槽点和左右交点  $[{}^w L_i, {}^w P_i, {}^w Q_i, {}^w R_i]$  如图21所示。



图21 穴盘壁的凹槽和左右交点

Fig. 21 Grooves and left and right intersections of tray walls

穴盘壁两侧边缘较为平缓的区域呈现直线特征如图22所示。该特征由红色线段表示,即点  ${}^w L_i$  和  ${}^w R_i$  在世界坐标系的  $x - O_w - z$  平面下的投影呈现直线,分别为  $L_L$  和  $L_R$ , 并且  $L_L$  和  $L_R$  对称的中心线为图22中的绿色线段。将  ${}^w L_i$  对称置  ${}^w R_i$ , 然后将对称过后的  ${}^w R_i$  投影值平面  $x - O_w - z$ , 使用三维空间直线拟合算法求取拟合的直线,直线拟合结果如图23所示。

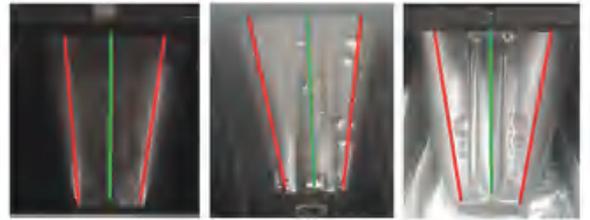


图22 直线特征

Fig. 22 Line feature



图23 直线拟合

Fig. 23 Straight line fitting

与凹槽曲线的提取一样,将  $L_L$  和  $L_R$  进行升维,得到左右切平面,最终的左右交点为左右切平面与激光中心曲线的左右交点。提取出的在  $Curve_i$  中的一条直线内的直线交点拟合补齐结果如图24所示。可以发现左右交点有了明显的好转。三角面提取的结果如图25所示,其中黄绿色的部分为穴盘壁两凹

槽直线曲面,红蓝色的部分为本节提取的穴盘壁其余部分的直线曲面,这里直线的含义为该曲面在同一高度下为直线。该曲面的最高处的直线长度为穴盘格上开口直线部分边长,最低处的直线长度为穴盘格下底面直线部分边长。取苗终端在进行取苗操作的下降阶段时只需要将苗铲边缘与三角面相切就可以保证苗铲紧贴穴盘壁。



图 24 直线交点拟合补齐

Fig. 24 Line intersection fitting and filling

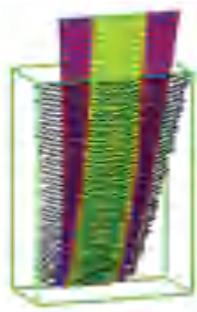


图 25 三角面插值

Fig. 25 Triangular surface interpolation

### 4.4 穴盘格三维重建

由于穴盘格的 4 个穴盘壁是沿着穴盘格中央中心线中心对称的,因此只要找到这根中央中心线,就可以对一个穴盘格的所有穴盘壁进行 3 维建模。

穴盘是放置在水平面上的,因此每一个穴盘格的中央中心线必定垂直于该水平面。穴盘格的下底

面边是一个正方形,该正方形所在的平面就是穴盘放置的水平面。穴盘格中央中心线垂直于该正方形,并且与该正方形的中心点相交。

令正方形的中心位置为点  ${}^w P_p$ , 那么有:

$${}^w P_p = \begin{pmatrix} \frac{X_{left} + X_{right}}{2} \\ \frac{Y_{top} + Y_{bottom}}{2} \\ \frac{Z_{top} + Z_{bottom}}{2} \end{pmatrix}, \text{get } Y_C = \frac{{}^w R_3 + {}^w R_4}{2} \cdot \frac{LB}{2}, H_B \quad (15)$$

以  ${}^w P_p$  为坐标原点,旋转矩阵  ${}^w R_p$  为单位矩阵可以构建穴盘格坐标系  $\{P\}$ 。沿着  $\{P\}$  的  $\hat{Z}$  轴每隔  $90^\circ$  进行一次旋转拷贝,总共进行 3 次旋转拷贝后就可以构建一个完整的穴盘格,不同类型的穴盘格三维重建构建结果如图 26 所示。

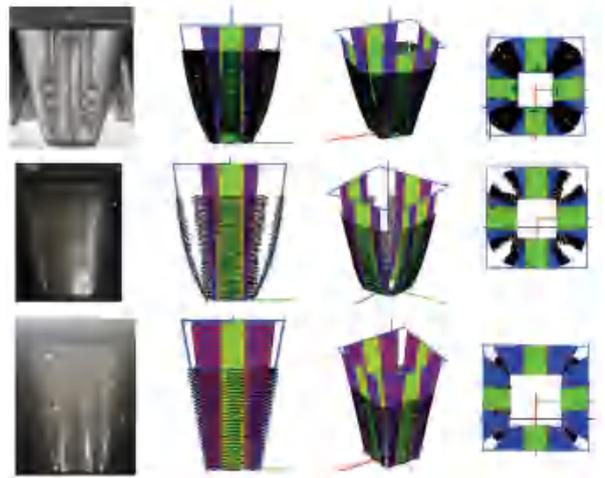


图 26 不同类型的穴盘格三维重建

Fig. 26 3D reconstruction of different types of plug grids

## 5 实验

本实验对市面上常见的大、中、小三种穴盘进行测量,首先使用游标卡尺对穴盘格顶部开口边长(包括曲线)、穴盘格底部边长(包括曲线)、穴盘格的高度、穴盘壁两凹槽之间的距离、穴盘格的底部直线边长、穴盘格的顶部开口直线边长等参数进行测量,测量的结果见表 2。

表 2 穴盘参数的测量结果

Table 2 Measurement results of plug parameters

穴盘规格	顶部开口边长	底部边长	高度	凹槽间距	顶部开口直线边长	底部直线边长	穴盘田垄宽度	凹槽深度
大	64.0	29.0	70	13	45	9.5	5	1.5
中	39.0	15.0	45	8	22	12.0	3	0.5
小	27.6	13.5	40	6	16	9.6	3	0.7

然后使用本文所设计的采集终端、采集方法、提取算法对大、中、小三种穴盘的穴盘壁进行采集,每

种类型的穴盘各自采集 20 次,得到的均值结果见表 3。

表3 采集终端测量结果

Table 3 Measurement results of collecting terminal						mm
穴盘规格	顶部开口边长	底部边长	高度	凹槽间距	顶部开口直线边长	底部直线边长
大	61.767 9	29.321 8	70.542 3	13.369 2	35.468 6	13.528 2
中	37.339 9	15.405 4	45.263 1	8.418 93	19.009 3	10.866 5
小	26.607 7	13.690 2	40.742 6	5.906 86	21.086 3	11.745 9

对表2、表3的数据求差,顶部开口边长的误差分别为2.232 1 mm、1.660 1 mm、0.992 3 mm。其中,大穴盘的误差最高,这是由于大穴盘在其开口处的穴盘壁有一定的向外弯曲特征,如图27所示。



图27 开口向外弯曲

Fig. 27 opening curved outward

对表2、表3数据作并,底部边长、高度、凹槽间距大中小穴盘的测量误差为:底部边长0.321 8 mm、0.405 4 mm、0.190 2 mm;高度0.542 3 mm、0.263 1 mm、

0.742 6 mm;凹槽间距0.369 2 mm、0.418 93 mm、0.093 14 mm。可以发现这几组数据的精度较高,但仍然存在误差,可能的误差来源:穴盘属于廉价的工业产品,自身的误差较大;水平面的误差,机械手臂的误差;人为测量的误差;相机与激光的误差;浮点类型造成的误差。

顶部开口直线边长与底部直线边长的测量误差来源为曲线部分中的直线部分没有明确的定义,人为测量存在较大的主观因素。本文提出了一种更加科学的判别该数据精准度的手段:将采集终端获取的数据使用游标卡尺标出,然后将游标卡尺返回到实际的穴盘格当中使用人眼观测观察是否合格,提取的结果如图28所示,可以发现穴盘壁顶部开口直线边长与底部开口直线边长的提取都满足苗铲取苗时的需求。



图28 直线边长提取结果

Fig. 28 Extraction results of straight line side length

## 6 结束语

针对在嫁接过程中使用苗铲进行穴盘苗取苗过程中的穴盘格参数获取问题,本文设计了一个取苗终端,并提出了一个基于激光线条的穴盘格参数提取方法,包括:激光二值图片的获取、激光中心线的获取、三维点云穴盘壁与穴盘上边沿的获取、穴盘格高度的获取、穴盘格上下曲线边长的获取、穴盘壁每

一点的三维重建以及穴盘壁在不同高度下曲线部分中直线部分的获取、穴盘格的三维重建。实验结果表明上开口曲线边长的误差、下底部边长曲线的误差、高度的误差、凹槽间距误差较低,能够满足取苗终端取苗时穴盘格的参数获取的需要。

由于受到实验条件的限制,本文无法对穴盘壁曲面的建模结果进行精准度的评估。由于穴盘壁曲面在不同高度下的直线部分没有明确的长度定义,

本文对顶部开口直线边长和底部直线边长的精确度无法进行定量分析,仅从定性的角度通过人眼观察总结出测量的结果可以满足取苗需求,有待继续研究。

## 参考文献

- [1] 高辉. 蔬菜嫁接技术研究进展及应用研究[J]. 农民致富之友, 2016(18):170.
- [2] 刘生财,郑秀玉. 西瓜种苗嫁接技术与集约化管理[J]. 园艺与种苗, 2023, 43(10):46-47.
- [3] 张凯良,褚佳,张铁中,等. 蔬菜自动嫁接技术研究现状与发展分析[J]. 农业机械学报,2017,48(3):1-13.
- [4] 付月胜,宋健,解福祥,等. 蔬菜嫁接机研究现状及发展趋势[J]. 农业开发与装备, 2021(10):25-29.
- [5] 王家胜,张峰峰,刘志波,等. 蔬菜自动嫁接装备及技术研究进展[J]. 青岛农业大学学报(自然科学版),2017,34(4):303-307.
- [6] 王哲禄,程向娇,尤文生. 基于机器视觉的蔬菜嫁接机自动上苗控制系统设计[J]. 安徽农业科学,2019,47(7):218-220.
- [7] 张学东,崔巍,刘云强,等. 穴盘苗移栽自动取投苗技术研究现状与展望[J]. 中国农机化学报, 2023, 44(12):17-24.
- [8] 胡敏娟,吴崇友,袁文胜,等. 穴盘苗自动取苗机构的研究分析[J]. 农机化研究,2012,34(7):78-83.
- [9] 楼建忠. 样斜插式瓜类蔬菜嫁接装置机理研究及优化设计[D]. 杭州:浙江大学,2014.
- [10] 马一凡. 穴盘苗移栽机取苗机构设计及实验[D]. 石河子:石河子大学,2020.
- [11] 鲁丁,王卫兵,韩帅. 取苗机械手运动控制联合仿真研究及试验[J]. 中国农机化学报,2023,44(2):8-13.
- [12] 武红玉. 阈值分割算法在图像处理中的应用[J]. 科技信息, 2012(27):201-202.
- [13] 张伟康,甄国涌,单彦虎,等. 激光条纹亚像素中心精确提取方法[J]. 激光杂志, 2023, 44(3):75-80.
- [14] 冀振燕,宋晓军,付文杰,等. 激光光条中心线提取研究综述[J]. 测控技术,2021,40(6):1-8.
- [15] 吴志远. 基于3D激光扫描的注塑件缺陷检测系统研究[D]. 广州:广东工业大学,2022.
- [16] 陈汉. 基于线结构光的机器人视觉系统开发与应用[D]. 太原:中北大学, 2023.
- [17] 鹿志旭,朱志浩,郭毓,等. 基于改进 SURF 特征点的图像匹配方法[J]. 软件导刊,2023,22(3):184-188.
- [18] 谷金峰. 平面几何图像中特征信息的抽取技术研究[D]. 桂林:广西师范大学,2021.
- [19] 薛丽红. 三维空间点中基于最小二乘法的分段直线拟合方法[J]. 齐齐哈尔大学学报(自然科学版),2015,31(4):84-85,89.
- [20] 莫小琴. 基于最小二乘法的线性与非线性拟合[J]. 无线互联科技,2019,16(4):128-129.