

## 激光与光电子学进展

基于自适应双向切片的橙子外形主动结构光  
三维点云测量方法陈辉<sup>1\*</sup>, 吴红艳<sup>1</sup>, 杨宁<sup>1</sup>, 黄和平<sup>2</sup>, 梁维斌<sup>3</sup><sup>1</sup>上海电力大学自动化工程学院, 上海 200090;<sup>2</sup>浙江正泰仪器仪表有限责任公司, 浙江 杭州 310052;<sup>3</sup>上海燧原科技有限公司, 上海 201203

**摘要** 获取果实生长期的外形参数指标, 监控果实发育状况以及提取水果特征尺寸用于品质分级是农业中的一项重要工作。传统测量方法易损坏果实表面形态, 基于二维图像特征处理的非接触式测量方法在测量各形态参数(尺寸、体积等)上具有局限性, 针对该问题, 提出一种自适应双向切片的非接触主动结构光式橙子外形参数三维测量方法。首先, 使用主动结构光三维相机获取橙子三维点云, 再利用搜索包围盒法计算其高度和直径; 然后, 为提高切片利用率, 引入自适应条件判断相邻切片垂直面积变化率与阈值的关系来自动更新切片及更新多边形面积以计算切块体积; 最后, 通过累加法计算完整的橙子体积, 且最终的计算值由双向计算得到的体积的均值确定。通过橙子仿真模型和两组类别真实橙子数据集上的验证, 对计算值与真实值进行了回归分析。结果表明, 平均耗时不大于 8.354 s, 其各指标的决定系数均高于 0.95, 橙子高度、直径及体积测量误差相较其他方法减少 3.5%、0.9%、0.7% 和 3.6%。

**关键词** 测量; 外形参数测量; 自适应; 双向切片; 非接触式

中图分类号 TP391

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP221279

An Active Structured Light 3D Point Cloud Measurement for Orange  
Shape Based On Adaptive Co-Opposite-Direction Slicing MethodChen Hui<sup>1\*</sup>, Wu Hongyan<sup>1</sup>, Yang Ning<sup>1</sup>, Huang Heping<sup>2</sup>, Liang Weibin<sup>3</sup><sup>1</sup>College of Automatic Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China;<sup>2</sup>Zhengtai Instrument (Hangzhou) Co., Ltd., Hangzhou 310052, Zhejiang, China;<sup>3</sup>Shanghai Enflame Technology Co., Ltd., Shanghai 201203, China

**Abstract** It is worth noting that determining the shape parameters of a fruit growth period, monitoring fruit development, and solving the problem of fruit characteristic size extraction for quality grading are essential in agricultural fields. However, traditional measurement methods are prone to damage fruit surface morphology, and the noncontact measurement method based on two-dimensional image feature processing has limitations in measuring various morphological parameters (e. g. , size and volume). To solve this problem, this paper proposes an adaptive co-opposite-direction slicing noncontact measurement method for the orange shape parameters. First, we use an active structured light three-dimensional camera to obtain the orange point cloud. Consequently, we calculate the height and diameter of the orange point cloud using the search bounding box method. Furthermore, to improve the slice utilization rate, we introduce adaptive conditions to examine the relationship between the change rate of adjacent slices' vertical area and the threshold value to automatically update the slices. After that, the polygon area is updated again to calculate the slice volume. Finally, the complete volume of the orange is calculated using the summation method, and the final calculated value is determined by the mean of the volume obtained through co-opposite-direction calculation. Based on the verification of the orange simulation model and two groups of real orange data sets, the results of regression analysis between the calculated and real values show that the coefficient of determination of each index is greater than 0.95, and the average time is no more than 8.354 s. Compared with other methods, the measurement errors of height, diameter, and volume of the orange

收稿日期: 2022-04-12; 修回日期: 2022-04-29; 录用日期: 2022-05-09; 网络首发日期: 2022-05-19

基金项目: 国家自然科学基金(51705304)、上海市自然科学基金面上项目(20ZR1421300)

通信作者: \*chenhui@shiep.edu.cn

simulation model are reduced by 3.5%, 0.9%, 0.7%, and 3.6%.

**Key words** measurement; shape parameter measurement; adaptive; co-opposite-direction slicing; non-contact

## 1 引言

植物果实的外形信息很大程度上反映了作物生长状况及产量,是对象形态分析的重要参数,也是果实品质分级的重要指标<sup>[1]</sup>。随着机器视觉的快速发展,非接触式三维(3D)测量在各领域的应用越来越广泛<sup>[2]</sup>,其主要利用图像处理技术提取外形特征<sup>[3-4]</sup>进行测量,但二维图像缺少深度信息,无法直接反映表面结构,在测量一些形态参数(尺寸、体积等)上存在一定的局限性。随着激光雷达和深度相机等三维采集设备的发展,三维点云数据为物体的3D重建提供了新手段<sup>[5-6]</sup>。Cai等<sup>[7]</sup>使用单目相机和线激光建立3D测量系统来计算马铃薯的体积和质量,其计算精度取决于马铃薯顶部和底部缺失点云的补全效果,但无法适用于苹果、梨等其他水果顶部有很大凹陷类别的测量。Méndez等<sup>[8]</sup>采用激光雷达技术测量橙子的大小,所计算出的重量与真实值比较并无显著差异,但直径测量误差较大,且采集点云数据耗时较长。

基于模型的方法主要利用曲面方程构建几何模型计算水果的外形参数<sup>[9]</sup>。Gené-Mola等<sup>[10]</sup>在遮挡背景下通过测量苹果两侧距离最远的点计算直径,再通过匹配球体模型计算体积,实现自动测量高度遮挡的苹果三维尺寸,但运算时间较长,无法在农业上进行大规模应用。

使用RGB-D相机采集水果深度信息也广泛应用于水果的3D测量与监测中<sup>[11]</sup>。Liu等<sup>[12]</sup>利用近距离的深度点云数据估计不同类别橙子几何特征,但橙子大小对检测成功率影响较大,遮挡更容易降低检测率。Yamamoto等<sup>[13]</sup>采用RGB-D传感器对苹果进行3D重建,将生成的点云在待测水果感兴趣的区域内进行更正,并测量苹果的体积和最大直径。Suzuki等<sup>[14]</sup>测量

洋葱的最大周长和体积,估计洋葱的密度参数。Wang等<sup>[15]</sup>估计芒果的长度和宽度等尺寸,适用于田间芒果果实大小的估算,但无法在强烈阳光下推广应用。Jadhav等<sup>[16]</sup>提出了一种基于体积和颜色的成熟度特征的无损、准确的水果分级系统,采用模糊规则分类器实现水果分级,并在多摄像机立体3D重建中估计水果体积,但对于估计表面缺陷的水果体积存在挑战性。Apolo等<sup>[17]</sup>利用深度学习技术开发了一种检测识别橙子方法,通过参考物体估算橙子大小,并根据深度图像预测重量,然而进行尺寸测量时,遮挡造成测量结果误差偏大,需通过多视图方法来减小结果误差。

为获取室外树上水果的三维形状信息,本文以橙子为研究对象,提出一种基于自适应双向切片法的非接触式橙子外形参数3D测量方法。实验首先对从4个表面角度以及底部获取的橙子点云数据进行3D重建,然后对重建点云双向切割得到系列点云切片,并对切片平面搜索以获得准确的边界轮廓来计算切片面积,最后根据相邻切片垂直面积变化率实现自适应点云切片自动分割进而计算点云外形参数。

## 2 数据处理

### 2.1 橙子外形参数测量

本文选取橙子仿真模型和真实橙子作为实验对象,计算其高度、两个相互垂直的直径以及体积作为外形指标参数。本文使用游标卡尺获得高度和直径的真值,由于排水法能够直接测量溢出的水的体积,简单方便,因此利用该方法测量橙子的实际体积,且使用烧杯和量筒按照直接或间接方式两次测量的平均值作为最终的真值。所需相关实验材料如表1所示,方法整体框架如图1所示。

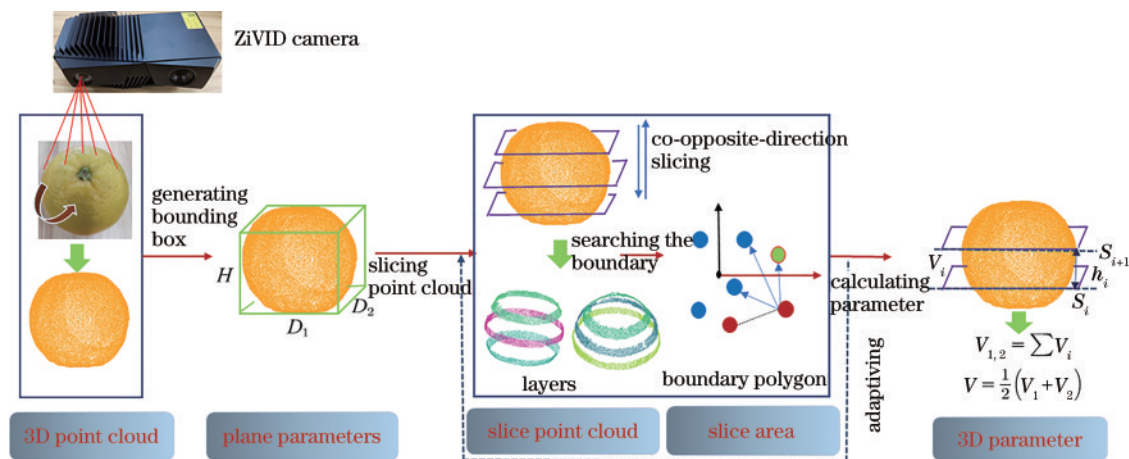


图1 基于自适应双向切片法的橙子三维测量框架图

Fig. 1 3D measurement frame diagram of orange based on adaptive co-opposite-direction slicing method

表 1 实验所需材料

Table 1 Materials needed for experiments

Name	Precision	Range	Number
Vernier caliper	0.01 mm	150 mm	1
Beaker	1 mL	1000 mL	2
Graduated cylinder	1 mL	500, 1000 mL	2
Iron stick	-	-	1

## 2.2 橙子 3D 点云数据采集与处理

### 2.2.1 原始 3D 点云采集系统搭建

为获得视角清晰且高质量的 3D 点云, 本文搭建主动时间编码结构光 3D 点云数据采集系统(图 2), 将橙子正立于转盘中心, 使用 ZiVID One Plus M 3D 相机进行点云数据采集。考虑到不同俯仰角拍摄对橙子测量精度的影响(避免反光), 调节镜头平面与橙子表面呈 45°, 且相机与橙子间的欧氏距离  $d=0.65\text{ m}$ 。实验中, 每次以标记好拍摄视角顺序的单个橙子为采集对象, 首先记录角度 1 时的初始 3D 点云, 然后顺时针转动转盘 90°, 转盘带着橙子旋转后采集到的点云作为角度 2 的点云, 直到旋转 360° 获得 4 片表面点云。软件使用 Matlab 2018b 以及 Visual Studio 2019, 点云保存为 PLY 文件。

### 2.2.2 3D 点云数据处理

由于采集到的橙子原始 3D 点云易包含冗余背景信息和不稳定噪声点, 为了得到干净的实验数据需要对点云进行预处理。本文通过 Cloud Compare 软件中的滤波器工具将橙子点云从噪声背景中分离, 再利用统计离群值滤波器去除离群点<sup>[18]</sup>。此时, 使用相机采



图 2 点云数据采集系统

Fig. 2 Point cloud data acquisition system

集的 3D 点云数据包含橙子的 RGB 颜色信息和 X、Y、Z 位置信息。

为获得橙子完整的 360° 表面 3D 点云重建模型, 本文利用迭代最近点(ICP)算法<sup>[19]</sup>对 4 个角度采集到的点云进行配准。通过不断迭代计算旋转矩阵  $\mathbf{R}$  和平移向量  $\mathbf{t}$ , 减小等式中的误差, 配准后, 相邻的拼接点云中有重叠数据, 使用移动最小二乘(MLS)法<sup>[20]</sup>对点云进行重合并平滑处理。

$$E(\mathbf{R}, \mathbf{t}) = \frac{1}{n} \sum_{g=1}^n \| \mathbf{q}_g - (\mathbf{R}\mathbf{p}_g + \mathbf{t}) \|^2, \quad (1)$$

式中:  $\mathbf{p}_g$ 、 $\mathbf{q}_g$  为源点云和目标点云。

由于相机视场角度因素, 无法完整拍摄到橙子底部区域, 因此该区域点云数据丢失, 需对底部数据进行补充。为获得橙子底部点云, 将其翻转侧立放置以进行拍摄采集, 令采集到的底部点云为  $\mathbf{P}_b$ , 由于将橙子进行了翻转, 此时它所在的坐标系  $X_1Y_1Z_1$  与表面点云坐标系  $X_2Y_2Z_2$  不同, 故为重建完整点云根据下式将  $\mathbf{P}_b$  绕  $x$  坐标轴旋转 90°, 再移动质心  $\mathbf{c}_b$  到表面点云的质心  $\mathbf{c}^{[21]}$ , 使底部点云和表面点处于同一坐标系  $X_2Y_2Z_2$  中, 图 3 是

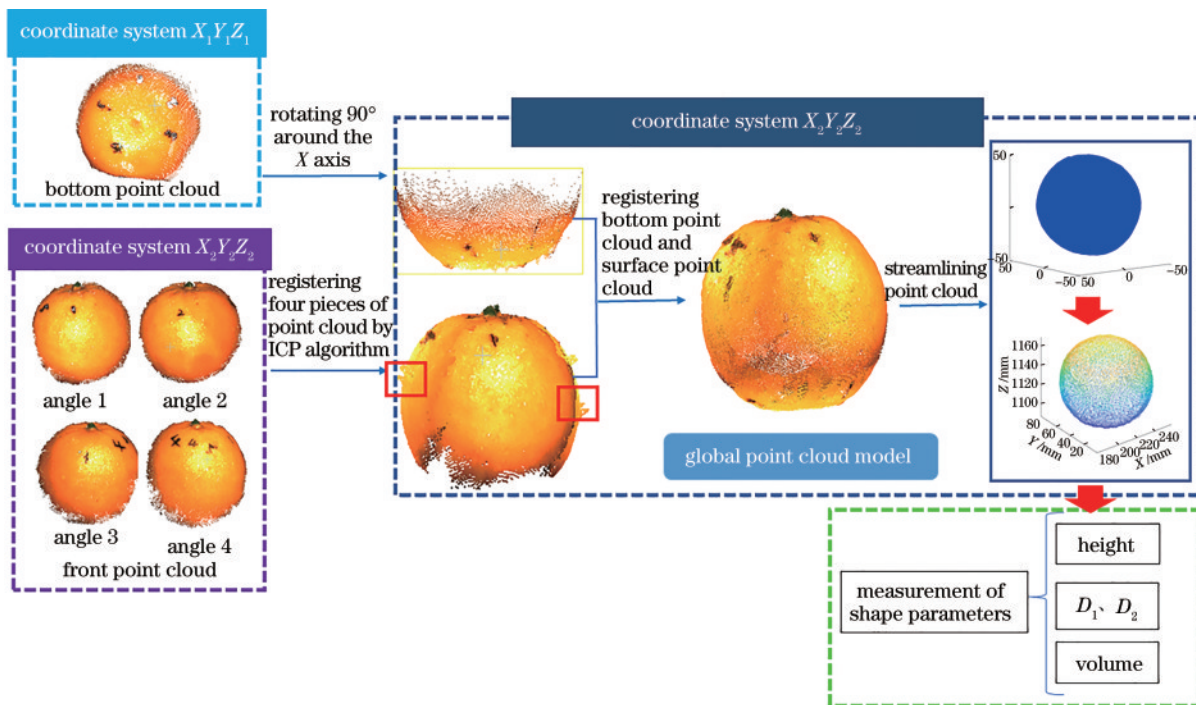


图 3 不同坐标系下配准后橙子的完整点云模型

Fig. 3 Complete point cloud model of registered oranges in different coordinate systems

在不同坐标系下得到的完整点云模型。

$$R_{(b)} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & -\sin \theta \\ 0 & \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix}, \quad (2)$$

$$T_{(b)} = c_b - c, \quad (3)$$

$$P_{b'} = R_{(b)}P_b + T_{(b)}, \quad (4)$$

式中： $P_b$ 是初始底部点云； $P_{b'}$ 为经过旋转后的底部点云； $T_{(b)}$ 为初始平移向量； $\theta$ 为 $90^\circ$ 。另外再次将处理后的底部点云与表面点云采用ICP算法进行配准后得到完整的点云，

$$P = (RP_b + t) + P_s, \quad (5)$$

式中： $P_s$ 是4片表面点云； $P$ 表示配准后的完整点云。

橙子表面比较光滑，数据采集时由于反光易出现数据畸变(图3中红色框)，利用插值方法<sup>[22]</sup>重建表面缺失部分。针对获得的橙子3D点云数据量大、影响运算效率问题，通过八叉树算法<sup>[23]</sup>进行精简压缩。

### 3 橙子外形参数计算方法

利用双向切片法<sup>[24]</sup>对橙子外形进行无损三维测量，无法实现自动切割，基于此，本文提出一种改进的自适应双向切片法获得橙子外形参数。

#### 3.1 橙子高度、直径测量

由于三维重建得出的完整3D点云数据与水平坐标平面 $X_2Y_2Z_2$ 并不垂直，而切片方向影响点云切片的结果进而影响测量结果，因此利用主成分分析算法进行坐标转换使得橙子点云垂直于坐标系底面。将经过坐标变换后的点云采用包围盒算法建立边界框，即以世界坐标系作为点云主方向，再搜索找到最小值点 $(x_{\min}, y_{\min}, z_{\min})$ 和最大值点 $(x_{\max}, y_{\max}, z_{\max})$ ，令包围盒内沿主方向 $x$ 从左向右的差值作为直径 $D_1$ ，沿 $y$ 轴从上到下的差值作为高度 $H$ ，沿 $z$ 轴从前到后的差值作为直径 $D_2$ ，如图4所示，具体计算公式为

$$D_1 = x_{\max} - x_{\min}, \quad (6)$$

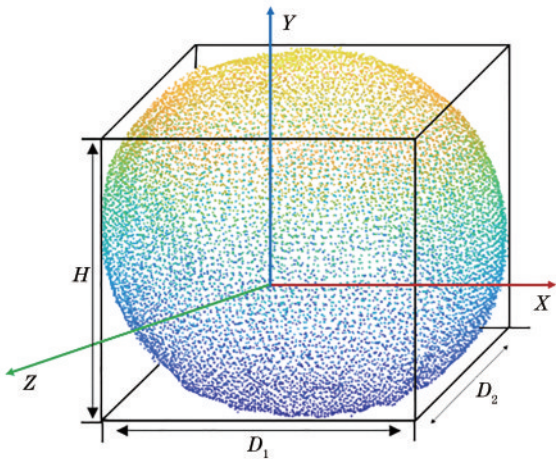


图4 橙子仿真模型的高度和直径

Fig. 4 Height and diameter of the orange simulation model

$$H = y_{\max} - y_{\min}, \quad (7)$$

$$D_2 = z_{\max} - z_{\min}. \quad (8)$$

#### 3.2 橙子体积测量

##### 3.2.1 3D点云数据切片

在水平方向上沿 $y$ 轴对橙子3D点云按照正向(自上而下)或反向(自下而上)根据以下公式进行等间距切片，得到水平点云切片集(图5)。

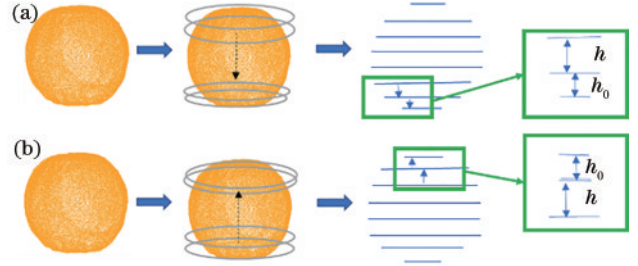


图5 橙子模型的正、反向切片示意图。(a)自上而下切片；(b)自下而上切片

Fig. 5 Schematic of positive and opposite cutting of orange model. (a) Slicing from top to bottom; (b) slicing from bottom to top

$$h = \frac{H}{n}, \quad (9)$$

$$h_0 = \{ [ H - h \times (n - 1) ] \}, \quad (10)$$

式中： $n + 1$ 为正向或反向切片数； $h$ 为切片间距； $h_0$ 为最后切片的高度且 $h_0 < h$ ； $H$ 表示 $y$ 向上最小值0和最大值之间的高度，即橙子点云的高度。

为避免二维投影出现放大效应，采用下式获得切片平面，

$$S_i = \left\{ D(x, y, z) \left| \begin{array}{l} x, z \in R^+, y = \frac{i}{n} H \\ i = 0, \dots, n \end{array} \right. \right\}, \quad (11)$$

式中： $i$ 为层数； $(x, y, z)$ 为点云切平面坐标。

##### 3.2.2 切片面积计算

点云切片外轮廓边界多边形的生成是有效计算切片面积的基础。为避免边界误差，使用 $k$ 近邻凹包算法<sup>[25]</sup>搜索平面边界，随着相邻点数的增加，将检测点的顶点依次连接得到一个封闭的凹包多边形，主要核心思想如图6所示。

1)选择平面点集中 $z$ 值最小的点 $P$ 作为初始检测点。设置初始 $k$ 值( $k=3$ )，通过欧氏距离搜索得到 $P$ 的 $k$ 个近邻点，即点 $A$ 、 $B$ 、 $C$ 。连接点 $P$ 与最近邻点作为候选线段，顺时针方向计算该线段与水平线之间的夹角，产生最大角度的点作为第二个检测点，即图6(a)中的点 $B$ 。为避免重复搜索，该点在后续搜索时被删除。

2)搜索当前顶点 $B$ 的 $k$ 个最近邻点。选取前一条线段 $PB$ 与候选线段夹角最大的点作为下一个检测点

[图 6(b)中的点 E]。而对于点 E 的一个最近邻点 G [图 6(c)],需要检查线段 EG 是否与之前形成的线段相交。如果不是,则 G 是检测点,否则,从最近邻点中删除该点,接着从其他最近邻点集中按照之前的方式选择产生最大角度的点。如果子集为空,则迭代 k 值并重新生成边界多边形,经过搜索判断,点 G 满足条件,可作为下一个检测点。

3)判断生成的多边形是否包含切片平面上所有的点。每个点的内部性通过计算从该点与凹包表面产生的射线的交点数量确定,奇数表示点在凹包内,否则,需要增加 k 值并重新计算。但 k 值选择过大时多边形会变得“光滑”使得边界过大,本文选择自适应迭代该值。

4)按照逆时针方向连接搜索到的检测点,构成凹包轮廓边界多边形,如图 6(d)所示。利用离散化的格林公式<sup>[26]</sup>计算产生的轮廓边界凹包多边形面积,

$$S_i = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^{m-1} \begin{vmatrix} x_j & z_j \\ x_{j+1} & z_{j+1} \end{vmatrix}, \quad (12)$$

式中: $S_i$ 为第 i 个切片的平面面积; $(x_j, z_j)$ 为切片平面多边形第 i 个顶点的坐标; $m$ 为平面多边形顶点的个数。

### 3.2.3 自适应切片

由于各个橙子形状和大小存在差异,使用统一厚度切片方法难以确定合适的点云单层厚度,且点云切片分层数量过多易增加计算复杂度,针对该问题,本文

提出一种自适应确定切片厚度和层数的切片方法来更新点云系列切片。沿 y 轴方向生成的不同切片上的点云平面面积不同,因此根据切平面面积垂直变化率自适应合并切片。方法框架如图 7 所示,其主要步骤如下。

1)根据式(5)等间距切割点云获得系列切片。首先切片间距取为 2 mm<sup>[24]</sup>,将包含少于三个点的切片与相邻切片合并,然后采用凹包算法计算切平片的面积。

2)根据下式计算切片面积变化率。相邻切片层包含公共重叠区域,按照面积垂直变化率与变化率阈值  $e_0$ <sup>[27]</sup>的关系进行合并,其中本文  $e_0=0.12$ 。公式为

$$e_i = \frac{|S_{i+1} - S_i|}{S_i}, \quad (13)$$

$$\begin{cases} Z_{i+1} = Z_i, & \text{if } e_i \leq e_0 \\ Z_{i+1} \neq Z_i, & \text{if } e_i > e_0 \end{cases}, \quad (14)$$

式中: $S_i$ 和  $S_{i+1}$ 为第 i 子块上、下边界面积; $Z_i$ 和  $Z_{i+1}$ 为第 i 和 i+1 层切片。

若切片平面面积满足以上公式,即相邻切片在面积变化不大的情况下,将上下两层合并为一层。层厚叠加为  $h_i = h_i + h_{i+1}$ ,其中  $h_i$ 和  $h_{i+1}$ 为层厚度,否则,不合并,将 i+1 和 i+2 层重新进行比较。

3)重复步骤 2。将满足合并条件的切片正向或反向进行组合,获得更新的系列点云切片。

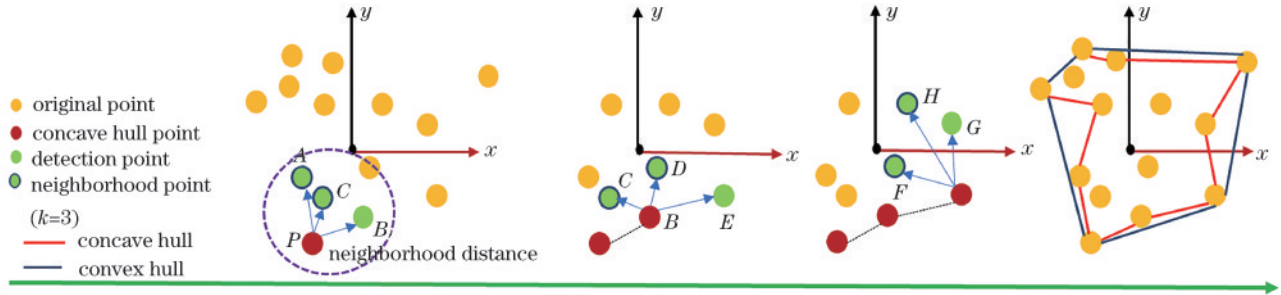


图 6 k 近邻凹包算法原理图(k=3)

Fig. 6 Schematic diagram of k-nearest neighbor concave hull algorithm (k=3)

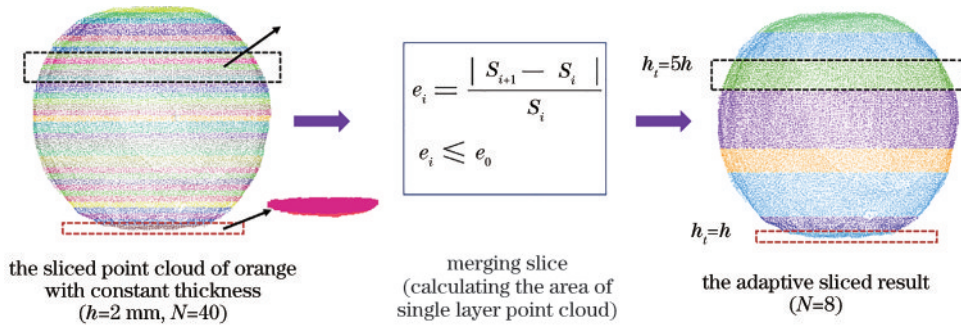


图 7 点云自适应切片

Fig. 7 Adaptive slicing of point cloud

### 3.2.4 橙子体积计算

更新点云切片后,根据式(12)重新计算切片面积,并计算每个切块的体积,切块的总和即为橙子的体积,

$$V_i = \frac{1}{2} (S_i + S_{i+1}) h_i, \quad (15)$$

$$V_{1,2} = \sum_{i=1}^N V_i, \quad (16)$$

$$V = \frac{1}{2} (V_1 + V_2), \quad (17)$$

式中:  $V_i$  为第  $i$  层体积;  $h_i$  为第  $i$  层的切片厚度;  $V_1$  和  $V_2$  为所有切块的体积相加的正向、反向体积;  $N$  为水平切片的数量。

为提高计算结果的可靠性和精度, 将  $V_1$  和  $V_2$  的均值  $V$  作为橙子最终的体积, 以消除随机误差及减少定向系统误差。

### 3.2.5 计算效果定量评价指标

为了实现真实场景下水果外形参数指标的测量, 本文采用时间复杂度及误差评价指标定量评价算法优缺点。

#### 1) 时间复杂度

算法的时间复杂度由算法运行时所消耗的时间来度量, 而度量其运行时间通常有两种方法, 包括事后统计方法及事前分析估算方法。虽然事后统计方法较依赖于计算机硬件等环境因素, 但为了直接体现出本文方法的有效性, 时间复杂度表示为

$$T(n) = O[f(n)], \quad (18)$$

式中:  $n$  为输入数据的大小;  $T(n)$  和  $f(n)$  为时间复杂度、时间频度最大的语句频度。

本文使用  $k$  近邻凹包搜索算法的时间复杂度为  $O(n^2)$ , 且将平均时间 ( $T$ ) 作为参数指标进行评价。

#### 2) 计算误差评价指标

选择相对误差 (RE)、平均误差 (ME)、均方根误差 (RMSE) 以及决定系数 ( $R^2$ ) 作为算法其他性能评价指标<sup>[28]</sup>对实验结果进行评价分析, 计算公式为

$$E_{RE} = \frac{|y_i - x_i|}{x_i} \times 100, \quad (19)$$

$$E_{ME} = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M |y_i - x_i|, \quad (20)$$

$$E_{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{M} \sum_{i=1}^M (y_i - x_i)^2}, \quad (21)$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^M (y_i - x_i)^2}{\sum_{i=1}^M (y_i - \bar{y}_i)^2}, \quad (22)$$

式中:  $M$  为本实验中样本总数;  $y_i$  和  $x_i$  为第  $i$  个样本的真实值、计算值;  $\bar{y}_i$  为  $M$  个样本真实值的平均值; RMSE 是真实值与计算值的均方误差的平方根, 该值越大, 表明回归效果越差, 反之效果越好; 决定系数  $R^2$  表示回归直线对计算值的拟合程度, 其值越大, 表明拟合效果越好, 计算值也越接近真实值。

## 4 结果与分析

为验证所提方法的有效性和可行性, 以橙子仿真模型 [图 8(a)]、真实橙子实物 [图 8(b)] 为实验对象, 对其高度、直径以及体积进行实验测量。

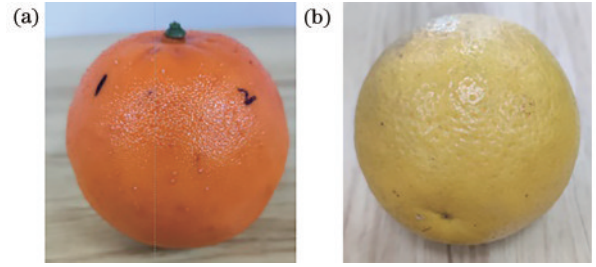


图 8 橙子图片。(a) 仿真模型; (b) 真实橙子  
Fig. 8 Pictures of the orange. (a) Simulation model; (b) real orange

### 4.1 橙子仿真模型实验结果

实验选取的仿真模型形状为球体且光滑均匀, 其真实高度和直径均为 80 mm, 体积为 245.46 mL。根据实验可得, 橙子仿真模型的参数耗时不大于 8.354 s, 其中各参数计算结果以及相对误差如表 2 所示, 实验结果表明, 本文方法是有效的。

表 2 橙子仿真模型外形指标测量结果

Table 2 Measurement result of the orange simulation model appearance indicators

Parameter	Height / mm	$D_1$ / mm	$D_2$ / mm	Volume / mL
Calculated value	80.71	81.51	81.71	247.89
RE / %	0.21	0.89	1.89	2.14

### 4.2 真实橙子实验结果

为进一步验证所提方法的有效性, 本文实验选取高度、直径和体积分布范围分别为 44.28~87.42 mm, 43.48~97.28 mm 和 79.85~416.76 mL 的 20 个真实橙子进行采集, 并将底部较尖的数据集标记为 I, 底部偏扁平的数据集标记为 II, 获得两组 (各 10 只) 3D 点云数据集。对橙子点云预处理并测量其外形参数, 通过与真实值比较, 结果展示在图 9 中, 橙子各参数的相对误差、计算值与真实值之间的决定系数、均方根误差及平均耗时结果如图 10 所示。

图 9 为橙子在类别 I 和 II 下点云数据的计算值与真实值, 图 10 表明类别 I 中橙子的参数计算误差比类别 II 的小, 最大相对误差为 5.36%、5.37%、5.38%、5.34% 以及 5.36%、5.40%、5.41%、6.30%。由于橙子拍摄时表面存在反光, 采集到的点云有一些畸变并且数据不完整, 以致编号为 7 和 14 的橙子相对误差最大。表 3 给出了橙子综合外形参数测量结果的定量评价指标, 可以看到, 两组类别下, 高度、直径  $D_1$ 、 $D_2$  和体积的测量结果的平均误差为 1.215 mm、1.242 mm, 1.203 mm、1.387 mm、1.399 mm、1.374 mm、3.944 mm、4.245 mL, 计算结果的平均误差较小, 也说明了本文方法对于测量点云形态参数是有效的。本文在搜索近邻点获得边界轮廓多边形时时间复杂度较高, 消耗了一定的搜索时间, 且由于采用双向切片, 本文方法所需的

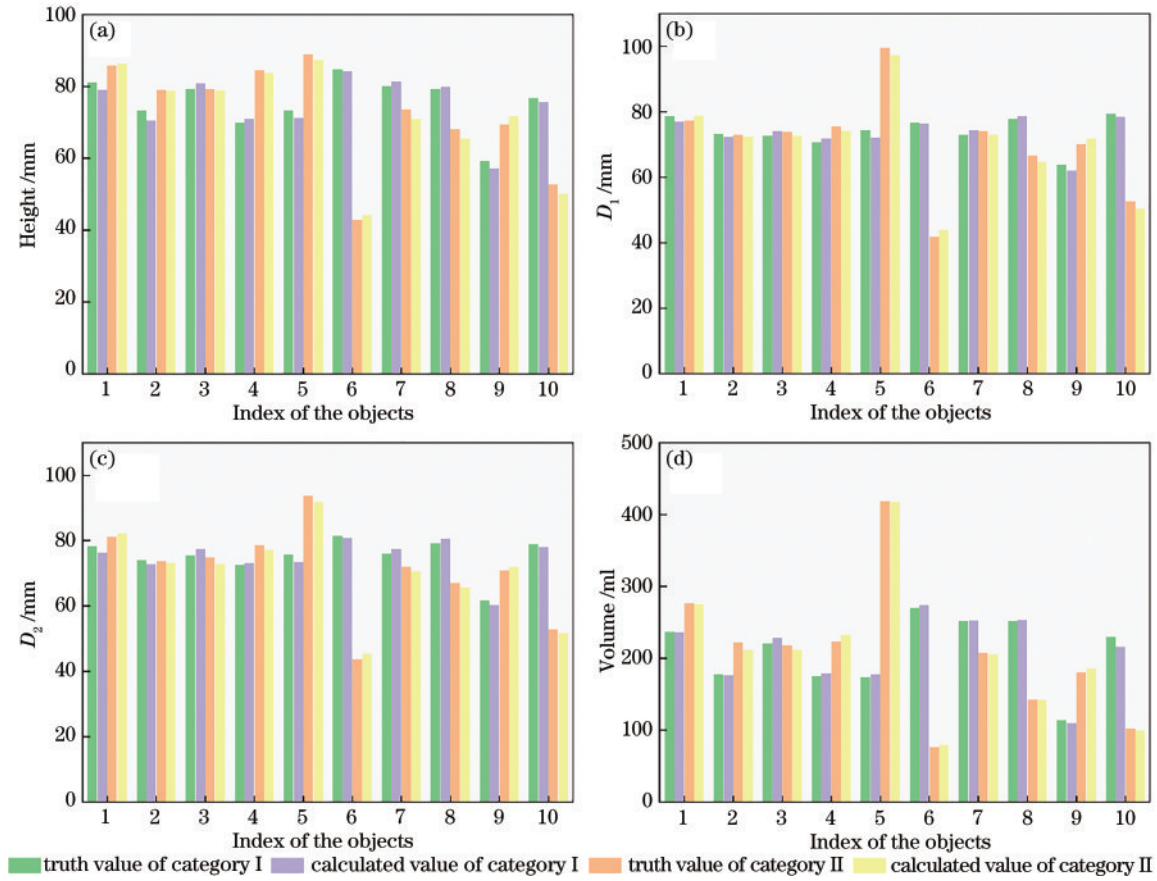


图 9 橙子外形指标测量。(a)高度; (b)  $D_1$ ; (c)  $D_2$ ; (d) 体积

Fig. 9 Measurement of shape index of the orange. (a) Height; (b)  $D_1$ ; (c)  $D_2$ ; (d) volume

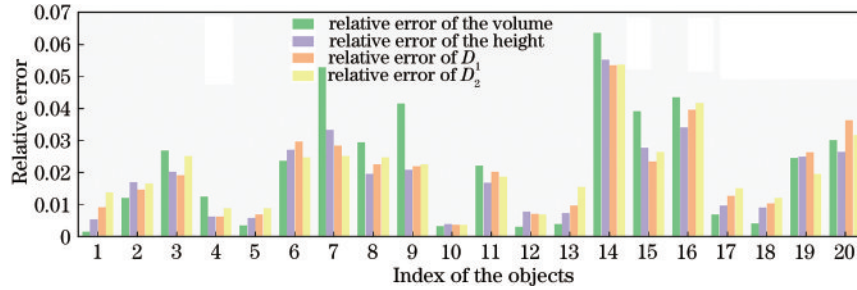


图 10 橙子外形指标相对误差

Fig. 10 Relative error of the orange shape index

表 3 橙子外形参数测量结果

Table 3 Measurement results of orange shape parameters

Dataset	Height				$D_1$				$D_2$				Volume			
	$R^2$	RMSE / mm	ME / mm	T/s	$R^2$	RMSE / mm	ME / mm	T/s	$R^2$	RMSE / mm	ME / mm	T/s	$R^2$	RMSE / mm	ME / mm	T/s
I	0.980	1.210	1.215	0.115	0.974	1.265	1.203	0.115	0.970	1.308	1.399	0.115	0.987	5.537	3.944	7.826
II	0.979	1.213	1.242	0.122	0.976	1.258	1.387	0.122	0.968	1.313	1.374	0.122	0.979	7.223	4.245	8.354

计算时间较多。图 11 是一种线性相关关系,表明所测的橙子外形参数与各参数实际值之间的偏差,其  $R^2$  都在 95% 以上,相对误差也在合理的误差范围内,表 3 证明了本文方法对真实橙子的三维测量是有效的。其中,点云配准精度对实验结果的误差大小也有一定的影响。

通过图 10 和图 11 可知,类别 I 中体积参数的  $R^2$  比类别 II 中的较大且 RMSE 较小,其原因是 I 中的橙子底部较尖,II 中的橙子底部偏扁平。本文在使用切片法计算体积时,底部较尖的橙子在计算底面切片面积时误差较小,所得到体积也更接近真实值。类别 I 中直径的  $R^2$  均比类别 II 中的较大且 RMSE 均较小,相

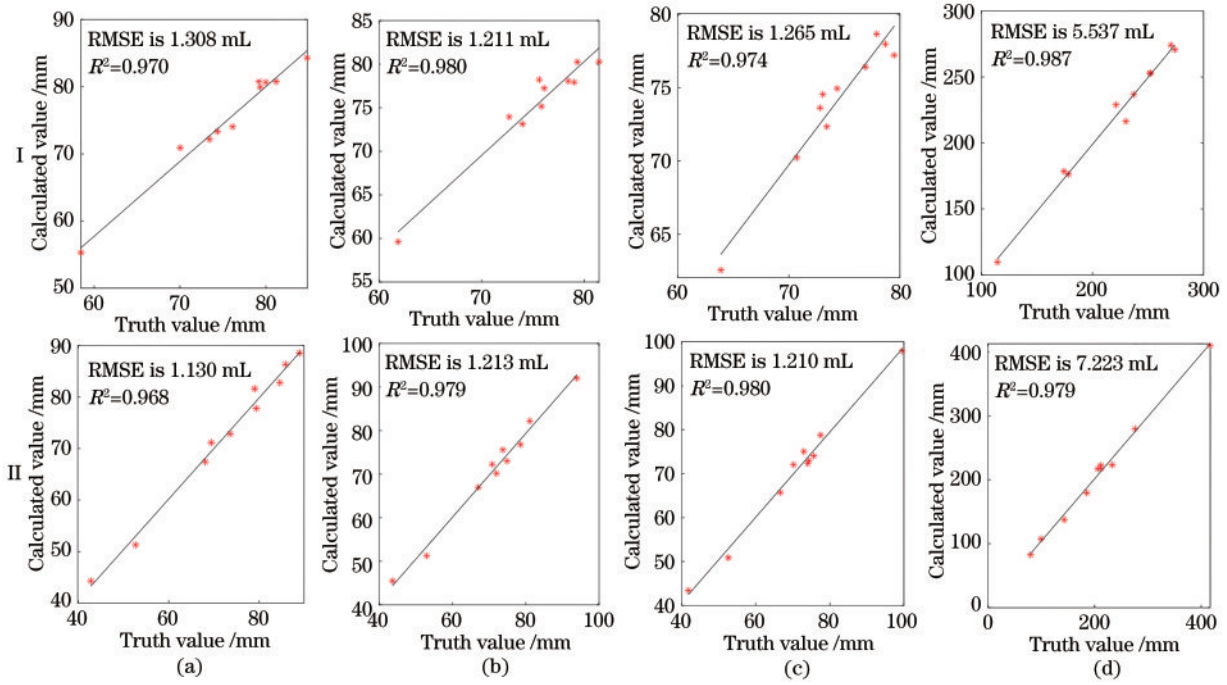


图 11 I、II 下橙子外形指标的计算结果。(a)高度;(b)  $D_1$ ; (c)  $D_2$ ; (d)体积

Fig. 11 Calculation results of orange shape indexes under I and II. (a) Height; (b)  $D_1$ ; (c)  $D_2$ ; (d) volume

反,高度参数在类别 I 中的  $R^2$  比类别 II 中的相对较小且 RMSE 较大,结合评价指标分析可知,底部较尖的橙子点云的最值点可能存在缺失或者点云存在一定的倾斜,导致高度测量误差偏大。

### 4.3 橙子外形参数测量方法的比较

为了验证所提方法的有效性,与文献[8]、[29]、[7]进行对比分析,结果见表 4。文献[7]测量的体积误差最小,决定系数  $R^2$  为 0.988, RMSE 为 5.534 mL。该方法的体积测量取决于顶部和底部缺失点云的修复效果,更适合顶部和底部较规则以及较尖的橙子,这使

得它在修复之后经过平滑处理能够准确地计算出体积参数。而本文方法的体积误差低于文献[29]测量的体积误差,提高了 3.6%。文献[29]基于图像处理方法对橙子进行三维测量,它的测量值取决于球体(将橙子视为球体)的半径,同时,实验物体真实体积较小时,经过图像处理方法的体积测量值比实际体积较小,这也增加了测量的误差。通过对比分析,本文方法在高度、直径  $D_1$  和  $D_2$  参数上分别提高了 3.5%、0.9% 和 0.7%,虽然文献[8]通过引入橙子的最大尺寸来调整形状获得球体模型,但这也加大了其余参数的测量误差。

表 4 不同方法下橙子外形参数的测量误差对比

Table 4 Measurement error comparison of orange shape parameters under different methods

Dataset	Method	Height		$D_1$		$D_2$		Volume	
		$R^2$	RMSE /mm	$R^2$	RMSE /mm	$R^2$	RMSE /mm	$R^2$	RMSE /mm
I	Ref. [8]	0.919	1.908	0.965	1.262	0.927	1.805	-	-
	Ref. [29]	0.945	1.466	0.945	1.462	0.945	1.466	0.951	5.856
	Ref. [7]	-	-	-	-	-	-	<b>0.988</b>	<b>5.534</b>
	Proposed	<b>0.980</b>	<b>1.210</b>	<b>0.974</b>	<b>1.265</b>	<b>0.970</b>	<b>1.308</b>	0.987	5.537
II	Ref. [8]	0.918	1.907	0.962	1.260	0.930	1.822	-	-
	Ref. [29]	0.948	1.462	0.948	1.462	0.948	1.462	0.945	5.904
	Ref. [7]	-	-	-	-	-	-	<b>0.974</b>	<b>5.499</b>
	Proposed	<b>0.979</b>	<b>1.213</b>	<b>0.976</b>	<b>1.258</b>	<b>0.968</b>	<b>1.313</b>	0.979	7.223

## 5 结 论

针对接触式测量易损坏表面特征,且基于二维图像处理的非接触式测量具有局限性的问题,为满足农业中室外橙子的无损测量与果实监测,本文提出一种基于自适应双向切片法的非接触式橙子外形参数三维

测量方法。首先以橙子仿真模型为实验对象进行了外形参数测量,结果表明本文方法是有效的。同时,测量 2 组类别下的真实橙子外形参数并与其他方法比较,结果表明本文测量值与真实值具有更高的线性相关性,  $R^2$  均高于 0.95,高度、直径  $D_1$  和  $D_2$  以及体积参数分别提高了 3.5%、0.9%、0.7% 和 3.6%。虽然本文



方法时间复杂度较高,在计算体积时消耗了较多的时间,但测量结果的平均相对误差较小,在测量精度上有了一定的提高。本文方法对底部较尖的橙子(类别 I)测量精度更高,并对诸如马铃薯、番茄、苹果、梨和柠檬等也具有通用性。然而降低时间复杂度以及提高不规则物体的三维测量精度问题尚有待继续研究,同时,在物体受损或遮挡情况下参数的精确测量在未来的工作中有待跟进并进行解决。

### 参 考 文 献

- [1] Sun S P, Li C Y, Chee P W, et al. Three-dimensional photogrammetric mapping of cotton bolls *in situ* based on point cloud segmentation and clustering[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2020, 160: 195-207.
- [2] 冯维, 汤少靖, 赵晓冬, 等. 基于自适应条纹的高反光表面三维面形测量方法[J]. 光学学报, 2020, 40(5): 0512003.  
Feng W, Tang S J, Zhao X D, et al. Three-dimensional shape measurement method of high-reflective surfaces based on adaptive fringe-pattern[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(5): 0512003.
- [3] Sanchez P D C, Hashim N, Shamsudin R, et al. Applications of imaging and spectroscopy techniques for non-destructive quality evaluation of potatoes and sweet potatoes: a review[J]. Trends in Food Science & Technology, 2020, 96: 208-221.
- [4] 张子健, 程效军, 曹宇杰, 等. 结合激光与视觉点云的古遗迹三维重建应用[J]. 中国激光, 2020, 47(11): 1110001.  
Zhang Z J, Cheng X J, Cao Y J, et al. Application of 3D reconstruction of relic sites combined with laser and vision point cloud[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(11): 1110001.
- [5] Sun G X, Wang X C. Three-dimensional point cloud reconstruction and morphology measurement method for greenhouse plants based on the kinect sensor self-calibration[J]. Agronomy, 2019, 9(10): 596.
- [6] Bhargava A, Bansal A. Fruits and vegetables quality evaluation using computer vision: a review[J]. Journal of King Saud University-Computer and Information Sciences, 2021, 33(3): 243-257.
- [7] Cai Z Y, Jin C Q, Xu J, et al. Measurement of potato volume with laser triangulation and three-dimensional reconstruction[J]. IEEE Access, 2020, 8: 176565-176574.
- [8] Méndez V, Pérez-Romero A, Sola-Guirado R, et al. In-field estimation of orange number and size by 3D laser scanning[J]. Agronomy, 2019, 9(12): 885.
- [9] 王浩云, 闫茹琪, 周小莉, 等. 基于局部点云的苹果外形指标估测方法[J]. 农业机械学报, 2019, 50(5): 205-213.  
Wang H Y, Yan R Q, Zhou X L, et al. Apple shape index estimation method based on local point cloud[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(5): 205-213.
- [10] Gené-Mola J, Sanz-Cortiella R, Rosell-Polo J R, et al. In-field apple size estimation using photogrammetry-derived 3D point clouds: comparison of 4 different methods considering fruit occlusions[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2021, 188: 106343.
- [11] Fu L S, Gao F F, Wu J Z, et al. Application of consumer RGB-D cameras for fruit detection and localization in field: a critical review[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2020, 177: 105687.
- [12] Liu J Z, Yuan Y, Zhou Y, et al. Experiments and analysis of close-shot identification of on-branch citrus fruit with RealSense[J]. Sensors, 2018, 18(5): 1510.
- [13] Yamamoto S, Karkee M, Kobayashi Y, et al. 3D reconstruction of apple fruits using consumer-grade RGB-depth sensor[J]. Engineering in Agriculture, Environment and Food, 2018, 11(4): 159-168.
- [14] Suzuki T, Futatsuishi K, Yokoyama K, et al. Point cloud processing method for food volume estimation based on dish space[C]//2020 42nd Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine & Biology Society, July 20-24, 2020, Montreal, QC, Canada. New York: IEEE Press, 2020: 5665-5668.
- [15] Wang W L, Li C Y. Size estimation of sweet onions using consumer-grade RGB-depth sensor[J]. Journal of Food Engineering, 2014, 142: 153-162.
- [16] Jadhav T, Singh K, Abhyankar A. Volumetric estimation using 3D reconstruction method for grading of fruits[J]. Multimedia Tools and Applications, 2019, 78(2): 1613-1634.
- [17] Apolo-Apolo O E, Martínez-Guanter J, Egea G, et al. Deep learning techniques for estimation of the yield and size of citrus fruits using a UAV[J]. European Journal of Agronomy, 2020, 115: 126030.
- [18] Rusu R B, Marton Z C, Blodow N, et al. Towards 3D point cloud based object maps for household environments [J]. Robotics and Autonomous Systems, 2008, 56(11): 927-941.
- [19] Besl P J, McKay N D. A method for registration of 3-D shapes[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1992, 14(2): 239-256.
- [20] Lancaster P, Salkauskas K. Surfaces generated by moving least squares methods[J]. Mathematics of Computation, 1981, 37(155): 141-158.
- [21] Wang Y W, Chen Y F. Fruit morphological measurement based on three-dimensional reconstruction [J]. Agronomy, 2020, 10(4): 455.
- [22] Wang G Y, Xu G, Wu Q, et al. Two-stage point cloud super resolution with local interpolation and readjustment via outer-product neural network[J]. Journal of Systems Science and Complexity, 2021, 34(1): 68-82.
- [23] Xie Q, Xie X Y. Point cloud data reduction methods of octree-based coding and neighborhood search[C]//Proceedings of 2011 International Conference on Electronic & Mechanical Engineering and Information Technology, August 12-14, 2011, Harbin, China. New York: IEEE Press, 2011: 3800-3803.

- [24] Li B, Bi X W, Peng C, et al. Calculation of point cloud object volume using the co-opposite-direction slicing method [J]. Russian Physics Journal, 2021, 64(7): 1289-1302.
- [25] Adriano M, Maribel Y S. Concave hull: a k-nearest neighbours approach for the computation of the region occupied by a set of points[C]//Proceedings of the Second International Conference on Computer Graphics Theory and Applications, March 8-11, 2007, Barcelona, Spain. Setúbal: SciTePress-Science and Technology Publications, 2007: 61-68.
- [26] 林松, 田林亚, 毕继鑫, 等. 三维激光扫描数据的单木树冠体积精确计算[J]. 测绘科学, 2020, 45(8): 115-122.  
Lin S, Tian L Y, Bi J X, et al. Accurate calculation of single-tree crown volume based on 3D laser scanning data [J]. Science of Surveying and Mapping, 2020, 45(8): 115-122.
- [27] Cheng L, Wu Y, Chen S, et al. A symmetry-based method for LiDAR point registration[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2018, 11(1): 285-299.
- [28] 柴宏红, 邵科, 于超, 等. 基于三维点云的甜菜根表型参数提取与根型判别[J]. 农业工程学报, 2020, 36(10): 181-188.  
Chai H H, Shao K, Yu C, et al. Extraction of phenotypic parameters and discrimination of beet root types based on 3D point cloud[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36(10): 181-188.
- [29] Fellegari R, Navid H. Determining the orange volume using image processing[EB/OL]. [2022-01-02]. <https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.1054.5989&rep=rep1&type=pdf>.