

## 基于结构光 3D 视觉的槟榔姿态识别与定位系统

余锦淼<sup>1,2</sup>, 吴静静<sup>1,2\*</sup><sup>1</sup>江南大学机械工程学院, 江苏 无锡 214122;<sup>2</sup>江苏省食品先进制造装备技术重点实验室, 江苏 无锡 214122

**摘要** 枸杞槟榔的放料工序目前仍需工人手动完成, 生产效率低且存在食品卫生问题。为了解决这个问题, 设计了一种基于结构光 3D 视觉的槟榔姿态识别与定位系统。首先, 由数字投影仪向槟榔投影蓝光正弦条纹, 相机采集变形条纹图像后, 通过计算机进行三维重建, 获得高精度槟榔点云; 然后, 融合 2D 图像和 3D 点云信息, 采用所提特征线法估计槟榔的姿态参数; 最后, 定位槟榔空腔中心并将其作为放料点, 根据手眼标定将放料点坐标转换到机械臂基坐标系下, 使机械臂自动放料。利用 500 个槟榔进行姿态识别与定位实验, 并统计处理时间和分类准确率。实验结果表明, 1 个槟榔的处理时间为 0.39~0.59 s。整体的识别准确率为 95.6%。对放料点的定位误差在 0.25 mm 之内, 低于放料要求的 0.3 mm。所提方法能有效解决形状复杂且自由放置目标的姿态识别与定位问题, 具有较高的定位精度以及良好的稳定性, 满足实际生产要求。

**关键词** 机器视觉; 结构光; 三维定位; 姿态估计; 手眼标定; 槟榔

中图分类号 TP391 文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP222667

## Betel Nut Pose Recognition and Localization System Based on Structured Light 3D Vision

Yu Jinmiao<sup>1,2</sup>, Wu Jingjing<sup>1,2\*</sup><sup>1</sup>School of Mechanical Engineering, Jiangnan University, Wuxi 214122, Jiangsu, China;<sup>2</sup>Jiangsu Key Laboratory of Advanced Food Manufacturing Equipment and Technology, Wuxi 214122, Jiangsu, China

**Abstract** The process of feeding wolfberry into betel nut still needs to be accomplished manually by workers, which has low production efficiency and food safety issues. To address this problem, betel nut pose recognition and positioning system based on structured light three-dimensional (3D) vision is designed. First, a digital projector projects blue sinusoidal fringe patterns onto betel nuts, and once the deformed fringe images are acquired, the computer performs 3D reconstruction to obtain a high-precision betel nut point cloud. Subsequently, two-dimensional (2D) image and 3D point cloud information are fused, and the proposed feature line method is used to estimate the betel nut pose parameters. Finally, the center of the betel nut cavity is positioned as the feeding point, which is subsequently converted to the base coordinate system of a robot arm according to hand-eye calibration to complete automatic feeding. Experiments on pose recognition and localization were conducted using 500 betel nuts, and both processing time and classification accuracy were evaluated. Results show that the processing time of one betel nut is 0.39–0.59 s. The overall recognition accuracy is 95.6%. The localization error for the feeding point is within 0.25 mm, which is lower than the 0.3 mm required for feeding. This demonstrates that the proposed method can effectively solve the problem of attitude recognition and positioning of freely placed targets within complex shapes and has high positioning accuracy and good stability to meet the actual production requirements.

**Key words** machine vision; structured light; three-dimensional localization; pose estimation; hand-eye calibration; betel nut

收稿日期: 2022-09-30; 修回日期: 2022-11-14; 录用日期: 2022-11-24; 网络首发日期: 2023-01-04

基金项目: 国家自然科学基金项目(62072416, 61873246)

通信作者: \*wjladylady720@jiangnan.edu.cn

## 1 引言

槟榔具有杀虫消积、行气利水和截疟等药用功效<sup>[1]</sup>。除此之外,它还有提神醒脑的作用,可以缓解工作疲劳<sup>[2]</sup>。在枸杞槟榔的生产过程中,多道工序都需要对槟榔进行定位<sup>[3]</sup>。但是由于槟榔的大小形状各异,空腔卤料高度不一,其 6D 姿态估计是槟榔自动加工工艺中的难点问题,如放料工序,人工目测放料存在误差和食品安全隐患。此外,6D 姿态估计在工业自动化、人机交互和虚拟现实等领域有广泛应用。因此,复杂场景下的 6D 姿态估计是计算机视觉领域的研究热点,具有较高的研究价值。

针对大小不一、自由放置后姿态各异的槟榔的精确定位问题,有一类方法是通过特殊设计的机械结构固定槟榔,使得槟榔姿态大致统一。文献[4]将单个槟榔放置在 V 形气浮台中,通过气体浮力和 V 形结构统一槟榔姿态。文献[5]和文献[6]采用动力偏心机构和扫平机构使有凹槽的料板发生激振运动,使得槽中的槟榔由于振动而旋转陷入凹槽底部,实现槟榔定位。文献[7]利用液体浮力摆正原理,提出可自动寻找槟榔对称面的定位方法,该方法能将槟榔固定在液面一定区域。类似地,文献[8]利用最小势能原理,结合零件定向送料使得开边莲仁(类似半剖槟榔)分型面向上,实现统一定位。文献[9]用传感器测量每个槟榔空腔内卤料液面高度,通过传感器返回的数据对放料高度进行调整,从而提高放料成功率。这些方法虽然可以实现槟榔的剖面定位,但是槟榔个体差异大、姿态不一,很难保证每个槟榔姿态都符合要求,导致定位准确率低,或者因为超出传感器量程,测量误差大,导致放料质量不稳定。

另一类方法是利用非接触式结构光实现槟榔的定位。近年来,利用 3D 信息进行智能感知与检测在农业和工业生产等领域有着许多突破性成果,如检测叶萎蔫<sup>[10]</sup>、分割和检测果园中苹果和香蕉<sup>[11-13]</sup>、采摘草莓<sup>[14]</sup>、自动收获鸡胸肉<sup>[15]</sup>等。文朝武等<sup>[16]</sup>利用 RGB-D 结构光相机获取番茄植株的深度信息,实现对授粉花朵的定位,为授粉机器人提供了一种新的定位方法。这类通过结构光定位的方法能有效实现对物体的定位,但缺乏对物体本身姿态的识别,在不固定姿态的情况下,定位效果较差。

因此,针对槟榔姿态各异导致自动放料成功率低的问题,本文融合 2D 图像与结构光系统获取的 3D 点云识别槟榔的姿态(正常、过度倾斜和翻转),筛选出符合放料的槟榔,接着对槟榔进行精确定位。结合手眼标定将放料点坐标转换到机械臂底座坐标系下,使机

械臂根据槟榔类别和位置自动放料。最后通过实验验证姿态识别算法的准确率和定位精度。

## 2 结构光 3D 视觉传感系统

### 2.1 系统结构

所设计的结构光传感系统由两个模块组成:三维重建模块和机械臂放料模块。为了使相机和投影仪的视野尽量覆盖更多槟榔,将三维重建模块与机械臂分开并置于料盘正上方,模块布局如图 1 所示。三维重建模块由工业相机和数字投影仪组成,两者光轴平行且垂直于工作平面,工作距离为 700 mm,水平间距为 100 mm。为了减少环境光的影响,投影仪投影蓝光正弦条纹。机械臂放料模块由一个六轴机械臂和气动吸嘴组成,气动吸嘴安装在机械臂末端。两个模块均与计算机连接,通过计算机处理三维重建模块采集的图像信息得到放料点坐标,并传输给机械臂引导其完成自动放料。

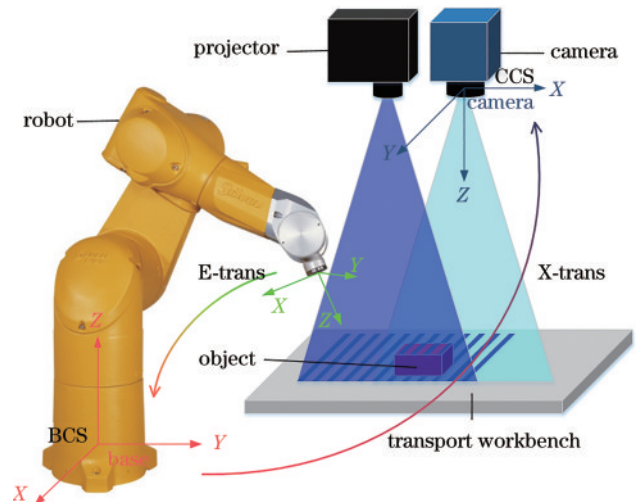


图 1 结构光 3D 视觉传感系统以及坐标系关系

Fig. 1 Structured light 3D vision sensing system and coordinate system relationship

### 2.2 算法流程

槟榔姿态识别与定位算法流程如图 2 所示。首先通过投影仪向槟榔投影蓝光正弦条纹,相机采集被调制的条纹图像和无条纹时的灰度图像后通过通用串行总线(USB)传输给计算机。计算机分别根据灰度图像进行 2D 定位和条纹图像进行 3D 重建(同时进行)。根据点云识别出槟榔姿态后,筛选出符合放料条件的槟榔。融合 2D 定位结果与点云信息进行 3D 精定位。最终将放料点的空间位置信息通过传输控制协议(TCP)发送给机械臂控制器,控制机械臂移动到放料点,实现自动放料。

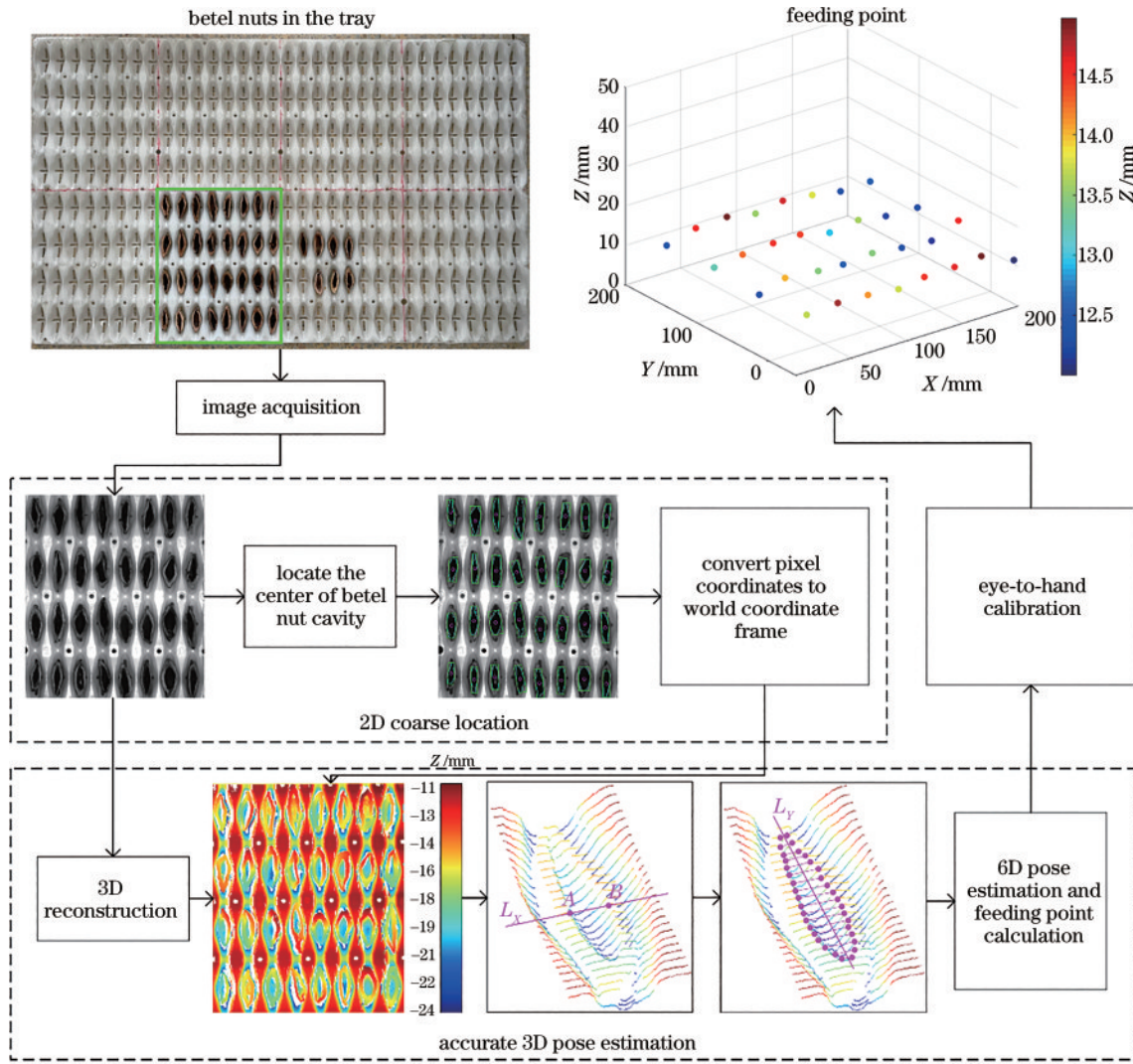


图 2 槟榔姿态识别与定位算法流程图

Fig. 2 Flow chart of betel nut poses recognition and localization

### 3 槟榔姿态识别与定位方法

#### 3.1 结构光三维重建

所采用的三维重建方法为相移轮廓术(PSP)<sup>[17]</sup>, 相移步数  $N=4$ 。采用的相位展开方法为三频外差法。条纹图像  $I_n$  可表示为

$$I_n(x, y) = a(x, y) + b(x, y) \times \cos[\varphi(x, y) + 2(n-1)\pi/N], \quad (1)$$

式中:  $a(x, y)$  为背景光强;  $b(x, y)$  为调制强度;  $\varphi(x, y)$  为条纹的相位;  $N$  为相移步数。四步相移法需要向槟榔投影相位分别为  $0, \pi/2, \pi, 3\pi/2$  的四种相位条纹和条纹数分别为 64、56 和 63 的三种频率条纹。通过式(2)计算每种频率四张条纹图像的相位, 并获得包裹相位图。

$$\varphi(x, y) = \arctan \frac{\sum_{n=1}^N I_n(x, y) \sin[2(n-1)\pi/N]}{\sum_{n=1}^N I_n(x, y) \cos[2(n-1)\pi/N]}, \quad (2)$$

式中: 由于反正切函数计算的相位范围是  $(-\pi, \pi]$ , 因

此得到的相位  $\varphi(x, y)$  被称为包裹相位。为了获取到真实的连续相位, 需要通过多频外差法进行相位解包裹得到连续分布的绝对相位。解包裹的过程可以描述为

$$\phi(x, y) = \varphi(x, y) + 2\pi k(x, y), \quad (3)$$

式中:  $\phi(x, y)$  为解包裹后的绝对相位;  $k(x, y)$  为当前像素对应的相位级次。

通过系统标定<sup>[18]</sup>获取相机与投影仪的内外参数, 根据标定参数和被槟榔调制的绝对相位图即可完成槟榔的三维重建, 得到槟榔的点云数据。图 3 为 PSP 三维重建过程, 最左边为三种频率的相移条纹图像, 通过相位计算得到三种频率的包裹相位, 根据外差原理解得绝对相位, 最后根据内外参数和绝对相位图计算得到槟榔每个点的 XYZ 坐标, 即点云数据。

#### 3.2 槟榔姿态识别与定位算法

目前, 形状复杂且自由放置目标的定位和姿态识别任务非常具有挑战性。枸杞槟榔半成品的外形和结构如图 4 所示, 表面纹理复杂多样, 中心为中空。槟榔的高度  $h$  为 8~13 mm, 空腔宽度  $w$  为 6~12 mm。根据

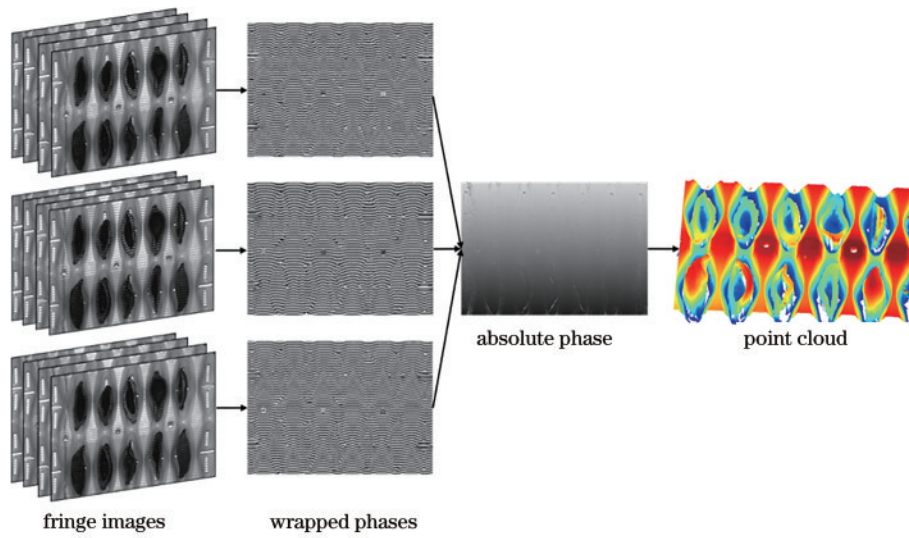


图 3 相移轮廓术三维重建过程

Fig. 3 The process of PSP 3D reconstruction

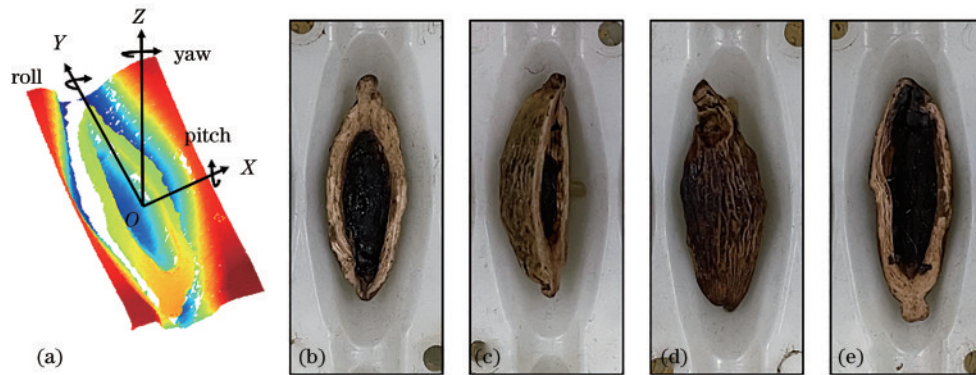


图 4 槟榔姿态角定义及四类槟榔。(a)姿态角定义;(b)正常;(c)过度倾斜;(d)翻转;(e)脏污

Fig. 4 Definition of attitude angles of betel nut and four types of betel nut. (a) Definition of attitude angles; (b) normal; (c) over-rolling; (d) upturned; (e) brine-stained

放料要求,槟榔的姿态可以分为3类:正常、过度倾斜和翻转。姿态表示如图4(a)所示,以槟榔空腔中心O为原点设置坐标系,俯仰角、翻滚角和偏航角分别表示绕X、Y和Z轴旋转的角度。正常的槟榔翻滚角在 $-53^{\circ} \sim 53^{\circ}$ 以内,且垂直方向的开口宽度大于等于6 mm;过度倾斜的槟榔翻滚角在 $-180^{\circ} \sim -53^{\circ}$ 或 $53^{\circ} \sim 180^{\circ}$ 之间;翻转的槟榔倒扣在料盘里,翻滚角大于 $180^{\circ}$ 。图4(e)是一种特殊情况,槟榔切口的壳体上有溢出卤液的斑点,将其分类为脏污。

所提算法融合2D图像和3D点云信息对槟榔姿态

进行识别和精确定位,具体流程如图5所示。采集完灰度图像和条纹图像后,2D图像定位和3D重建同时进行。2D定位中,先粗筛掉不符合放料条件的槟榔,减少3D算法的工作量并返回合格槟榔的空腔中心坐标。3D重建后,融合2D算法返回的空腔中心坐标和3D点云信息对槟榔进行姿态估计,进一步筛选掉不符合条件的槟榔,同时根据槟榔姿态修正空腔中心坐标得到放料点坐标。最后通过手眼标定得到坐标系转换矩阵,将放料点坐标转换到机械臂底座坐标系下使机械臂放料。

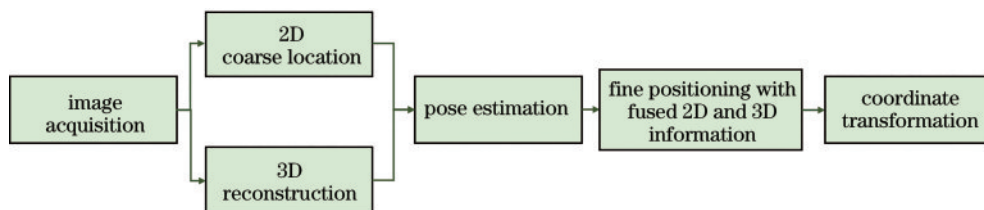


图 5 姿态识别与定位算法流程

Fig. 5 Flow chart of attitude recognition and positioning algorithm

### 3.2.1 槟榔姿态估计算法

槟榔的姿态测量流程如图 6 所示。首先将单个槟榔的点云按照料仓的大小从整个点云数据分割出来。接着对点云进行切片处理,并根据切片后获取的截面数据对槟榔进行姿态估计。

对槟榔点云切片时,由于点云是物体表面形状特征的离散化表达,严格按照切片平面上的点确定截面轮廓的话受点云密度影响很大<sup>[19]</sup>,因此将切面前后厚度为 0.2 mm 的点云投影至切面上生成界面轮廓。切片的计算过程如式(4)、(5)所示。最后根据切片获得

的截面数据进行姿态估计。

$$y_i = \begin{cases} y_{\min} + i \cdot h, & 0 \leq i \leq n - 1 \\ y_{\max}, & i = n \end{cases}, i \in N, n = \text{Ceiling} [(y_{\max} - y_{\min}) / h], \quad (4)$$

$P_i = \{p_0, p_1, \dots, p_a, \dots, p_n\}, p_a = \{x_a, y_a, z_a\} \in \mathbf{R}^3$ , (5) 式中:  $y_{\min}$  和  $y_{\max}$  是槟榔点云在 Y 方向的最小值和最大值;  $h$  为截面间隔, 大小为 1 mm; Ceiling 是向上取整函数;  $i$  为切片序号;  $y_i$  为切片平面位置, 如图 6(b) 中直线所示;  $P_i$  为从槟榔点云中分割出的轮廓点集;  $p_a$  为其中的一个点, 坐标为  $(x_a, y_a, z_a)$ 。

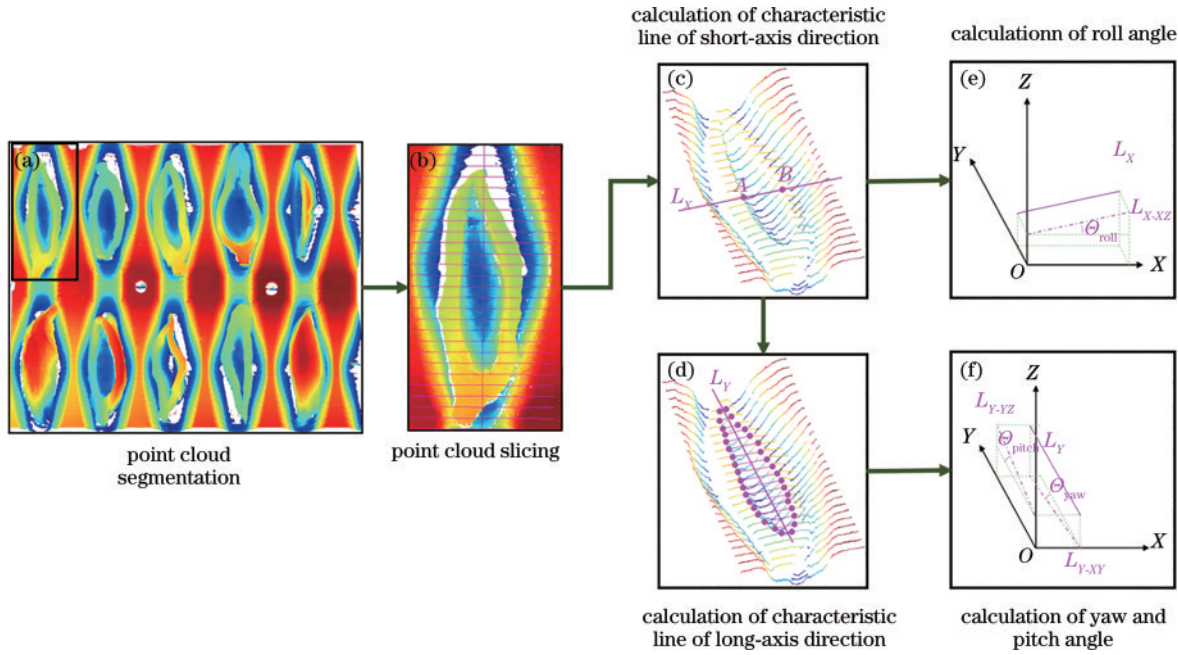


图 6 姿态估计流程

Fig. 6 Process of pose estimation

计算槟榔的翻滚角时,先根据通过槟榔中心点  $O$  的切面所截取的槟榔点云截面数据寻找到槟榔空腔与壳体的两个交界点  $A$  和  $B$ , 然后根据  $A$  和  $B$  的坐标计算出槟榔短轴特征线  $L_x$  [图 6(c)] 的表达式。将  $L_x$  投影至  $XOZ$  平面 [图 6(e)] 计算其与  $X$  轴夹角, 求出翻滚角  $\theta_{roll}$ 。计算槟榔的俯仰角时, 遍历每一个截面数据求出槟榔空腔与壳体的两个交界点  $A_i$  和  $B_i$ , 并计算两点连线的中点, 记为  $M_i (i = 1, 2, 3, \dots, n)$ 。根据点集  $M_i$  利用最小二乘法拟合出槟榔的长轴特征线  $L_y$  [图 6(d)]。将  $L_y$  投影至  $YOZ$  平面 [图 6(f)], 其与  $Y$  轴夹角即为俯仰角  $\theta_{pitch}$ 。同理, 将  $L_y$  投影至  $XOY$  平面, 可得偏航角  $\theta_{yaw}$ 。

### 3.2.2 槟榔空腔定位算法

首先对图像进行预处理, 提高槟榔与料盘的对亮度, 便于分割出槟榔卤料区域。接着给出分割卤料区域的最小外接矩形, 进而得到空腔的中心  $O$ , 如图 7 所示, 青色线连起来的区域, 即为槟榔卤料区域, 品红色圆圈为定位的空腔中心。然后, 获取空腔中心  $O$  所在

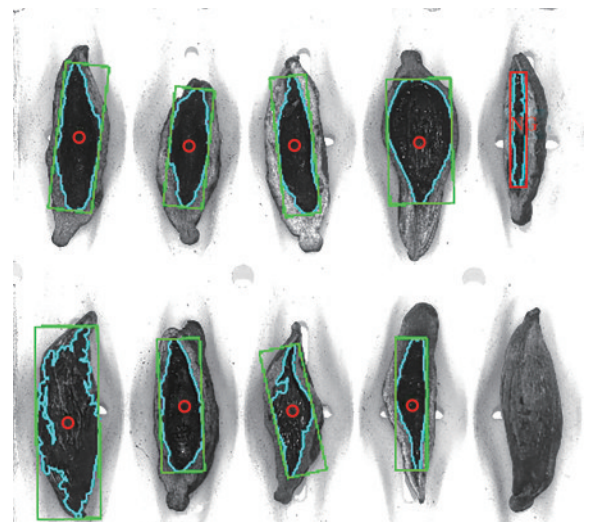


图 7 槟榔卤料区域分割结果

Fig. 7 Regional extraction demonstration of the betel nut brine zone

切面的槟榔截面数据, 如图 8 所示。在截面数据中, 以中心  $O$  的  $X$  坐标  $O_x$  为起点, 同时向  $X$  正反方向求导,

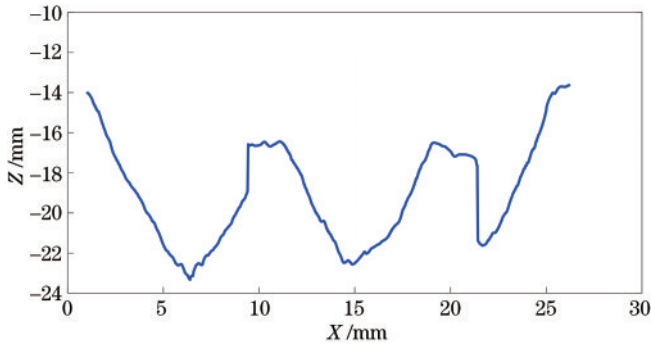


图 8 槟榔点云截面数据

Fig. 8 Cross section of areca nut point cloud

如式(6)、(7)所示,  $A$  为  $O$  左边的求导点,  $B$  为  $O$  右边的求导点, 当导数明显变低时, 表明  $A$  或者  $B$  已到达槟榔壳体内边缘。此时, 槟榔开口宽度  $W$  如式(8)所示, 取最大的开口宽度  $W_{\max}$  作为槟榔的空腔开口宽度。根据该截面数据获取空腔最低点的坐标, 即可修正中心点的坐标以及卤料液面高度, 得到相机坐标系下修正后的放料点坐标。

$$f_A' = A_y - O_y, \quad (6)$$

$$f_B' = B_y - O_y, \quad (7)$$

$$W = B_x - A_x. \quad (8)$$

通过坐标系变换将相机坐标系下的放料点坐标转化至机器人底座坐标系下的坐标, 手眼标定坐标系总体结构如图 1 所示。通过在执行器末端固定的标定板进行标定以获得机器人末端执行器坐标系、相机坐标系 (CCS) 和机器人底座坐标系 (BCS) 等坐标系之间的转换关系。

采用文献[20]提出的方法对整个系统进行手眼标定。手眼标定利用机器人运动后, 机器人末端与标定板的位姿关系始终不变的特点:

$$A_i Y = X E_i, \quad (9)$$

式中:  $A_i$  是标定板坐标系到 CCS 的变换矩阵;  $Y$  是机器人放料点坐标系到标定板坐标系的变换矩阵;  $X$  是 BCS 到 CCS 的变换矩阵;  $E_i$  是机器人放料点坐标系到 BCS 的变换矩阵。  $Y$  和  $X$  是固定不变的未知变换矩阵,  $A_i$  和  $E_i$  随机械臂末端执行器的位置和角度变化。所有变换矩阵可以表示为描述刚体变换的  $4 \times 4$  矩阵, 即式(10)中的  $3 \times 3$  旋转矩阵  $R$  和平移向量  $T$ 。

$$\begin{bmatrix} R & T \\ 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (10)$$

$A_i$  可以根据采集的棋盘格图像和相机标定原理<sup>[21]</sup> 计算。在机器人末端执行器上固定棋盘格标定板 ( $10 \times 7$  的边长为 30 mm 的黑白棋盘格), 然后控制机器人使其末端固定在不同的位置, 采集 15 组棋盘格图像, 图 9 为其中的 4 组, 标定板位置需遍历整个工作空间, 得到一系列  $A_i$ 。根据机器人末端执行器在 BCS 中的位置 ( $X, Y, Z$ ) 和方向 ( $R_x, R_y, R_z$ ) 计算出  $E_i$ 。将其中两组的数据代入式(9)可得到式(11), 利用机械臂

手眼标定原理可以计算出  $X$ 。矩阵  $X^{-1}$  即为所求的 CCS 到 BCS 的变换矩阵。在 BCS 中的放料点  $P_{FB}$  可以通过与变换矩阵相乘得到, 如式(12)所示。

$$A_{i+1} A_i^{-1} X = X E_{i+1} E_i^{-1}, \quad (11)$$

$$P_{FB} = T P_{FCO}. \quad (12)$$

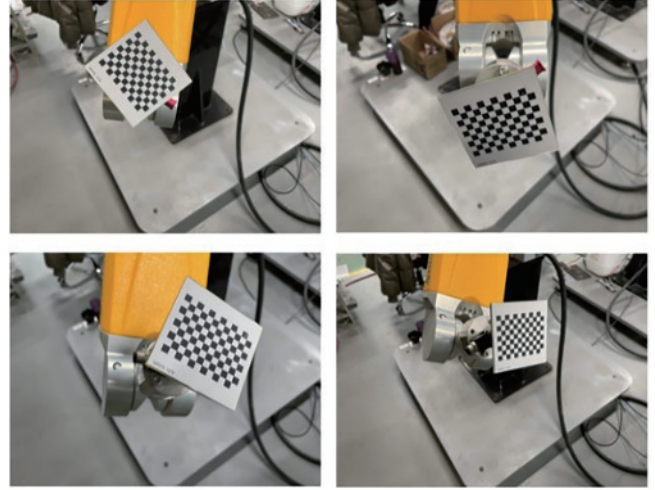


图 9 三维重建系统和机器人标定示例

Fig. 9 Examples of 3D reconstruction systems and robot calibration

### 3.3 姿态识别性能评估

采用完成任务所需的时间和从混淆矩阵(图 10)计算的姿态识别的准确率来评估系统性能。进行了 50 组实验, 每组有 10 个槟榔, 各组间槟榔不尽相同。这 500 个槟榔包含 4 种情况: 正常、过度倾斜、翻转和脏污。由人工测量和评估的槟榔姿态作为真值, 与姿态估计算法得到的结果进行对比得到姿态识别的正确率  $R_p$ 、过检率  $R_{OD}$  和漏检率  $R_o$ 。计算公式如式(13)~(15)所示, 其中, 字母  $A \sim H$  分别代表槟榔各种姿态 (normal、over-rolling、upturned、stain) 下, 算法估计值 (OK、NG) 的数量。

		observed results				
pose estimation results	true positive $A$	$B$	false positive $C$	$D$	OK	
	false negative $E$	$F$	true negative $G$	$H$	NG	
	normal	over-rolling	upturned	stain		

图 10 混淆矩阵

Fig. 10 Confusion matrices

$$R_p = \frac{A + F + G + H}{A + B + C + D + E + F + G + H}, \quad (13)$$

$$R_{OD} = \frac{F}{A + B + C + D + E + F + G + H}, \quad (14)$$

$$R_o = \frac{B + C + D}{A + B + C + D + E + F + G + H}. \quad (15)$$

## 4 实验与讨论

### 4.1 结构光 3D 视觉传感系统搭建

为了验证所提算法的有效性,搭建了基于槟榔定位与姿态识别的自动放料系统,包含三维重建模块和自动放料模块,如图 11 所示。三维重建模块由大恒灰度相机 MER-1070-14U3M (分辨率为  $3840 \times 2748$ )、Computar 镜头(焦距为 35 mm)、数字投影仪(分辨率为  $1280 \times 720$ )和一台处理器为 i7-10700、显卡为英伟达 GeForce RTX 3060、内存为 32 GB 的计算机组成。自动放料模块由史陶比尔 TX60 六轴工业机器人和一个气动吸嘴组成,机器人最大工作半径为 600 mm。三维重建模块安装在工作台上,与机械臂分离。槟榔被自由放置于料盘中,料盘被划分为 8 个子区,每个子区的尺寸为  $205 \text{ mm} \times 255 \text{ mm}$ ,可放置 32 个槟榔。

### 4.2 3D 姿态识别准确率和设备工作效率

采用所提算法对每组 10 个、共 50 组槟榔进行姿态估计实验。其中,3 组的结果如图 12 所示,虚线框框出的槟榔不符合放料条件,实线框上的数字为槟榔开口宽度,红绿蓝线条分别代表 XYZ 坐标轴,品红色坐标(上)为空腔中心坐标,绿色数字(下)为槟榔姿态角。10 个槟榔的姿态参数如表 1 所示。每个槟榔的开口宽度和 3 个姿态角均被精确测量,其中,第 7 个槟榔的宽

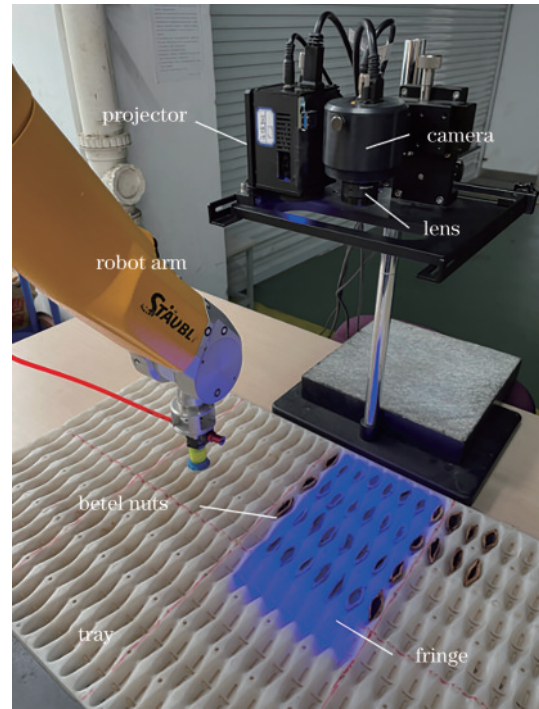


图 11 实验平台

Fig. 11 Experimental platform

度达到 10.17 mm,与槟榔的实际大小相吻合。卤料中心点的坐标也被准确地获取。

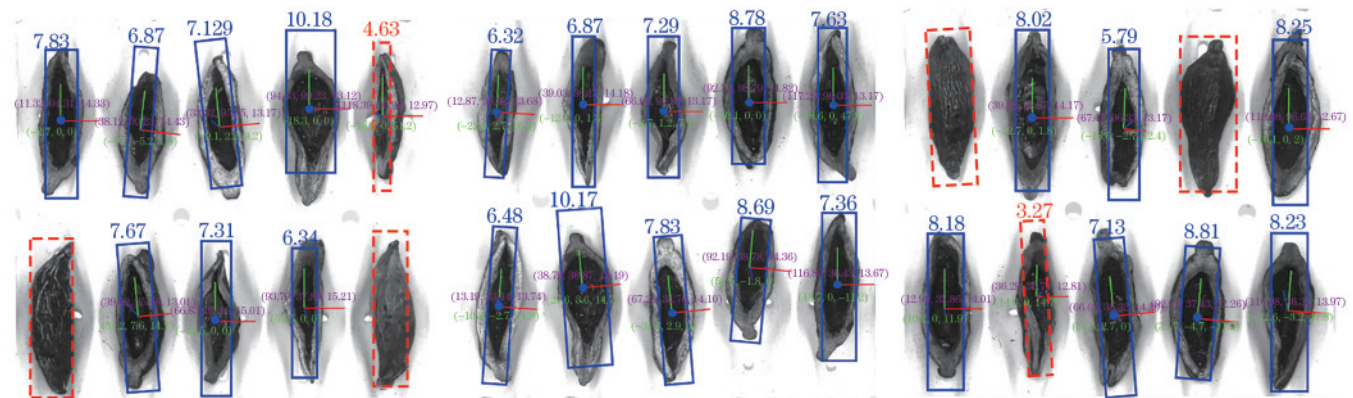


图 12 3组姿态估计实验结果

Fig. 12 Three groups of pose estimation experiment

选取 10 组样本统计姿态估计的准确率和效率,具体如表 2 所示。可以看出,总体精度范围在 90%~98% 之间,平均为 94.5%。翻转样本的准确率始终为 100%,表明姿态估计算法对于翻转样本的估计非常鲁棒。过度倾斜的准确率为 85%~96%,平均值为 91.4%,是这 4 种情况里最低的。从图 13(a)可以看出,槟榔的左边壳体与料盘接触,右侧空腔由于点云部分缺失,截面几乎竖直,导致算法出错。从图 13(c)可以看出,壳体上的脏污对姿态估计算法的影响较小,脏污槟榔的平均准确率为 96.3%。对整体 50 组的实验数据进行统计得到的结果如图 14 所示,3D 算法的正确率为 95.6%,过度倾斜的槟榔依然是所有情况中正

准确率最低的。主要的原因是,当槟榔翻滚角较大时,视角原因导致部分点云缺失,使得获取的截面数据产生较大误差,测量的翻滚角以及开口宽度的误差较大,被错判为符合放料条件。

每个槟榔的处理时间包括图像采集、三维重建和姿态估计这 3 部分。其中,3D 重建占的比例最大,因为需要进行大量矩阵运算,平均一个槟榔的点云大约有 8 万个点,平均每个槟榔的重建时间为 0.3 s。表 3 中第 4 组和第 7 组的时间分别为 0.39 s 和 0.41 s。由于这两组中 NG 槟榔比较多,被 2D 算法过滤掉,使得处理时间远低于平均水平 0.541 s。与实验 1~10 相同条件下,处理一个槟榔的时间中位数为 0.57 s(表 2),

表 1 所提 3D 姿态估计算法获得的检测结果

Table 1 Detection results obtained by the proposed 3D pose estimation algorithm

Index	Width /mm	Coordinate of the center	Height of brine /mm	Pitch /( $^{\circ}$ )	Yaw /( $^{\circ}$ )	Roll /( $^{\circ}$ )
1	6.32	(12.87, 96.32, 13.68)	13.68	-22.6	2.7	16.4
2	6.87	(39.03, 98.17, 14.18)	14.18	-12.7	0	1.8
3	7.29	(66.97, 97.83, 13.17)	13.17	2.7	1.2	7.7
4	8.78	(92.73, 98.79, 14.82)	14.82	-20.1	0	0
5	7.63	(117.29, 96.03, 13.17)	12.67	-18.6	0	47.8
6	6.48	(13.19, 33.14, 13.74)	13.74	10.2	-2.7	11.9
7	10.17	(38.79, 36.87, 13.19)	13.19	27.6	3.6	14.7
8	7.83	(67.23, 34.76, 14.10)	14.10	-31.8	2.9	0
9	8.69	(92.19, 38.78, 14.36)	14.36	52.5	-1.8	0
10	7.36	(116.89, 36.43, 13.67)	13.67	48.7	0	-11.2

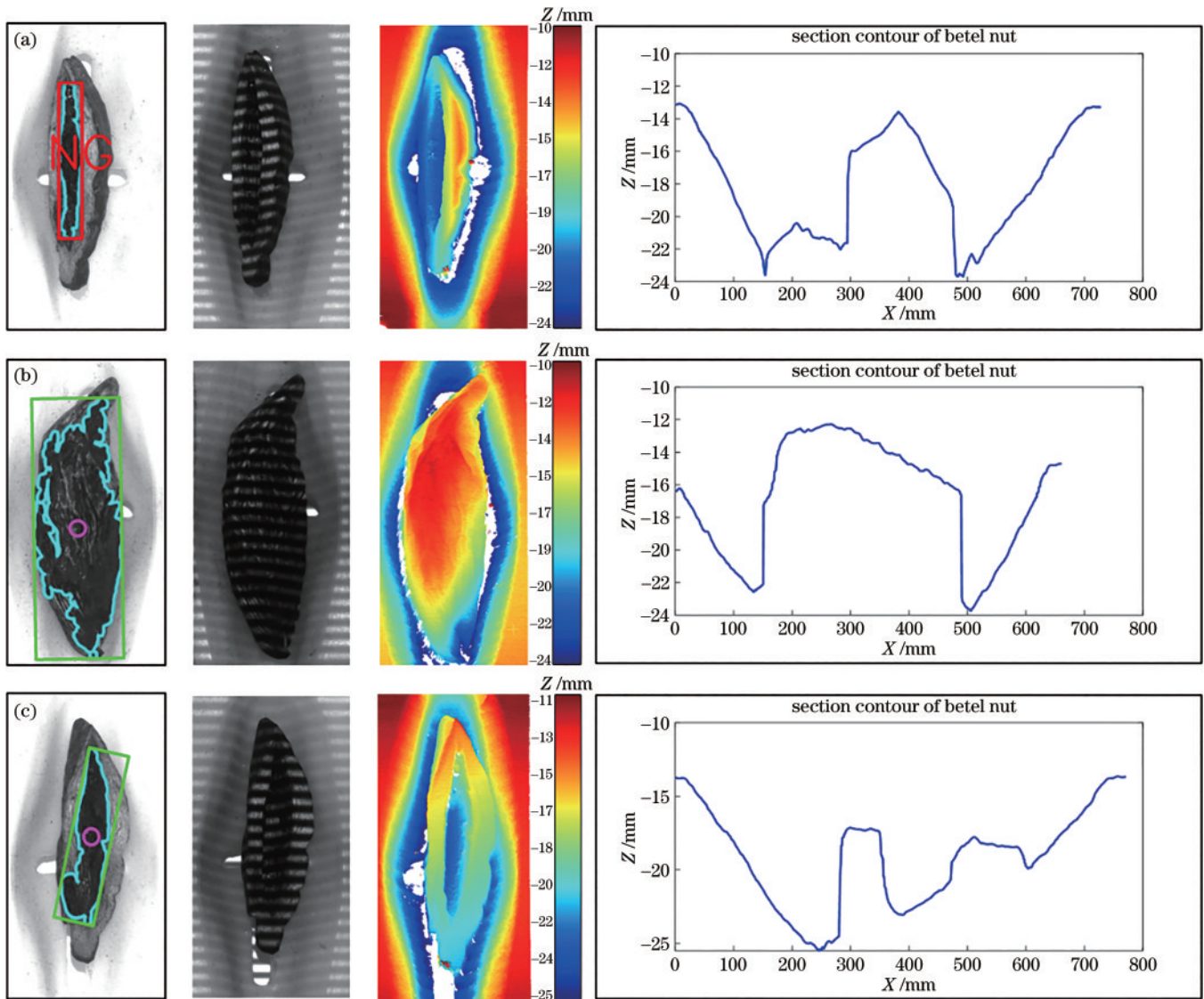


图 13 槟榔姿态估计时的 3 种情况。(a)过度倾斜;(b)翻转;(c)脏污

Fig. 13 Three typical postures of the betel nut handling process. (a) Over-rolling; (b) upturned; (c) brine-stained



表 2 10 组槟榔的姿态测量准确率和工作效率  
Table 2 Pose estimation accuracy and work efficiency in 10 groups

Index	Accuracy					Time /s	Efficiency number /min
	Normal	Over-rolling	Upturned	Stain	Overall		
1	0.91	0.85	1.00	0.93	0.92	0.55	103
2	0.88	0.93	1.00	0.97	0.96	0.59	95
3	0.97	0.96	1.00	0.99	0.98	0.61	89
4	0.93	0.94	1.00	0.98	0.95	0.39	136
5	0.92	0.88	1.00	0.95	0.90	0.57	102
6	0.90	0.91	1.00	0.95	0.91	0.55	108
7	1.00	0.89	1.00	0.97	0.94	0.41	121
8	0.98	0.89	1.00	0.98	0.96	0.58	96
9	0.95	0.96	1.00	0.95	0.98	0.60	87
10	0.94	0.93	1.00	0.96	0.95	0.56	108

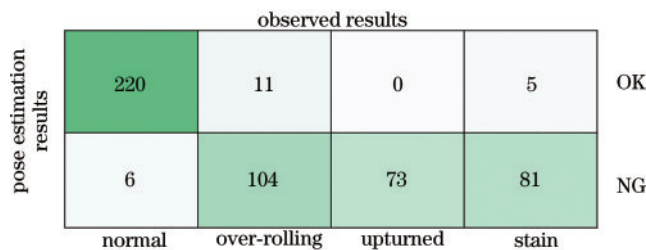


图 14 所提姿态估计算法得到的混淆矩阵

Fig. 14 Confusion matrix obtained by the proposed pose estimation algorithm

即每分钟加工 102 个槟榔。如果用 GPU 进行矩阵运算,将能大大提高三维重建的速度,从而提高槟榔处理的效率。

### 4.3 算法定位精度评估

评估算法定位精度的流程如图 15 所示。首先由投影仪向槟榔料盘投影蓝光正弦条纹,然后利用 PMP

实现对槟榔的三维重建,根据点云数据和槟榔定位算法计算得到在机器人基坐标系下的放料点坐标,如图 15(a)所示。待采集完条纹图像后,移动机器人末端吸嘴到达每个槟榔的放料位置,记录吸嘴的位姿数据作为机器人底座坐标系下的真实放料点坐标,如图 15(b)所示。选取 10 个槟榔进行定位精度评估测试,如图 15(c)所示。两种方法得到的放料点的坐标数据记录在表 3 中。

对表 3 中的数据进行分析,得到的结果如图 16 所示,所提算法定位的放料点与实际放料点的 X、Y 和 Z 坐标显示在图 16(a)中,且被投影在 X-Y 平面内便于观察。图 16(b)显示的是算法计算的放料点与实际放料点 X、Y 和 Z 坐标误差,均在 0.25 mm 以内,且标准偏差低于 0.2 mm,表明所提算法定位较准确和稳定,满足实际放料所要求的 0.3 mm。

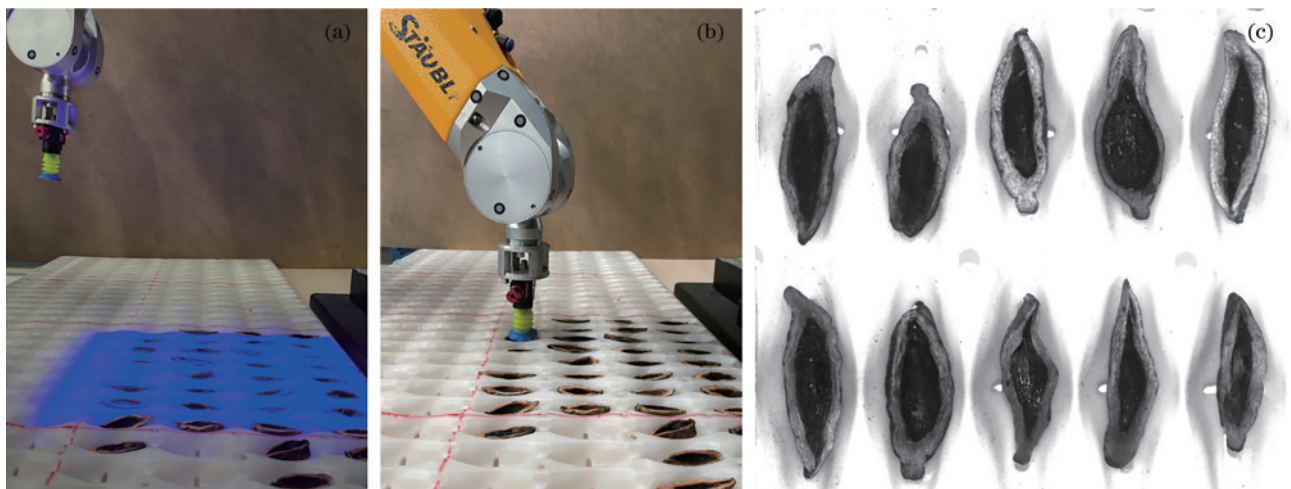


图 15 实验流程。(a)三维重建过程;(b)放料点实际位置获取过程;(c)待放料槟榔

Fig. 15 Experimental process. (a) 3D reconstruction process; (b) acquisition process of actual coordinates of feeding points; (c) betel nuts to be fed

表 3 定位精度评估实验结果

Table 3 Experimental results of the location accuracy evaluation

unit: mm

Index	Coordinates calculated by the proposed algorithm	Actual coordinates from pneumatic nozzle	Error		
	$(X_T, Y_T, Z_T)$	$(X_A, Y_A, Z_A)$	X	Y	Z
1	(-86.947, 676.534, -196.345)	(-87.13, 676.32, -196.32)	0.183	0.214	-0.025
2	(-60.735, 678.341, -195.694)	(-60.97, 678.17, -195.82)	0.235	0.171	0.126
3	(-33.182, 677.875, -196.737)	(-33.03, 677.83, -196.83)	-0.152	0.045	0.093
4	(-7.496, 678.686, -195.323)	(-7.27, 678.79, -195.18)	-0.226	-0.104	-0.143
5	(17.418, 676.243, -196.764)	(17.29, 676.03, -196.83)	0.128	0.213	0.066
6	(-86.626, 613.071, -196.163)	(-86.81, 613.14, -196.26)	0.184	-0.069	0.097
7	(-61.267, 616.75, -196.982)	(-61.21, 616.87, -196.81)	-0.057	-0.120	-0.172
8	(-32.863, 615.005, -195.769)	(-32.77, 614.76, -195.9)	-0.093	0.245	0.131
9	(-7.746, 618.639, -195.835)	(-7.81, 618.78, -195.64)	0.064	-0.141	-0.195
10	(17.083, 616.357, -196.359)	(16.89, 616.43, -196.33)	0.193	-0.073	-0.029
Standard deviation			0.157	0.149	0.120

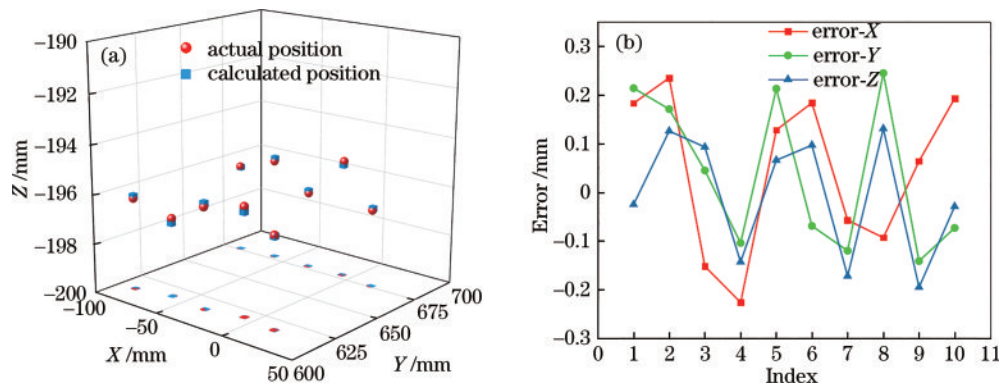


图 16 定位实验结果分析。(a)放料点定位;(b) X 坐标、Y 坐标、Z 坐标误差

Fig. 16 Analysis of location experimental results. (a) Location of feeding point; (b) errors of X, Y, and Z coordinates

## 4 结 论

设计了基于结构光 3D 视觉的槟榔姿态估计与定位系统,提出了融合 2D 图像和 3D 点云的姿态估计与槟榔定位算法。实验结果表明,所提系统在槟榔的姿态识别中具有很高的准确率和较强的鲁棒性,姿态识别准确率为 95.6%,能有效地筛选出适合放料的槟榔,但过度倾斜情况的定位准确率为 91.4%,尚有优化空间。定位误差在 0.25 mm 以内,小于放料要求的 0.3 mm,这意味着机器人能够精确且高效地完成放料任务、提高产能,降低食品安全风险。所提基于 2D-3D 信息融合的姿态识别与定位算法能有效解决形状复杂且姿态多样目标的姿态识别难题。

接下来,计划进一步增加相机数量,实现对槟榔多视角下的三维重建,提高算法对过度倾斜槟榔处理的适应性,以提高系统的定位精度和鲁棒性。也将运用 GPU 加速三维重建,提高槟榔的处理效率。所提机器人可以与槟榔点卤设备结合,形成全自动的点卤和放料智能机器人。虽然本研究关注的是可食用槟榔生产

线上的槟榔三维重构问题,但所运用的原理也可以推广到其他行业一些场景的三维重构应用,实现生产的自动化。

## 参 考 文 献

- [1] 刘小靖,王鹏龙,项嘉伟,等.以中医药思维理解“食用槟榔”与“药用槟榔”[J].中草药,2021,52(1):248-254.  
Liu X J, Wang P L, Xiang J W, et al. Dispute between “edible areca catechu” and “medicinal areca catechu” under thinking of traditional Chinese medicine[J]. Chinese Traditional and Herbal Drugs, 2021, 52(1): 248-254.
- [2] Lin C Y, Young Y H. The effect of betel nut chewing on the otolithic reflex system[J]. Clinical Neurophysiology, 2017, 128(1): 138-146.
- [3] 滨海龙.一种枸杞槟榔的制作方法:CN107625085A[P]. 2018-01-26.  
Bin H L. Making a method of Chinese wolfberry fruit areca catechu seeds: CN107625085A[P]. 2018-01-26.
- [4] 姜良兴.槟榔点卤连续生产线的设计与研究[D].湘潭:湘潭大学,2018.  
Jiang L X. Design and study of the continuous production line of adding bitterm into betel-nut[D]. Xiangtan:

- Xiangtan University, 2018.
- [5] 邹三中, 刘建波. 使槟榔片的剖切面自动向上的机构: CN2800820Y[P]. 2006-08-02.  
Zou S Z, Liu J B. Mechanism for making the cut surface of areca-nut pieces facing upward automatically: CN2800820Y [P]. 2006-08-02.
- [6] 阳波, 谢龙. 一种新型槟榔上片装置: CN203975297U [P]. 2014-12-03.  
Yang B, Xie L. A new type of betel nut slicing device: CN203975297U[P]. 2014-12-03.
- [7] 方志翔. 槟榔切片研究及虚拟样机设计[D]. 湘潭: 湘潭大学, 2013.  
Fang Z X. Research on areca-nut slicing and design of a virtual prototype[D]. Xiangtan: Xiangtan University, 2013.
- [8] 张惊. 开边莲混合物料的分选与开边莲仁翻边研究[D]. 湘潭: 湘潭大学, 2016.  
Zhang J. Study on the separation of the mixtures of splitting lotus seed and the turnover of splitting lotus seed kernel[D]. Xiangtan: Xiangtan University, 2016.
- [9] 刘志护. 智能化槟榔点卤设备: CN206137093U[P]. 2017-05-03.  
Liu Z H. Steamed equipment of intelligent sesame oil point: CN206137093U[P]. 2017-05-03.
- [10] Cai X, Sun Y, Zhao Y, et al. Smart detection of leaf wilting by 3D image processing and 2D Fourier transform [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2013, 90: 68-75.
- [11] Chen M Y, Tang Y, Zou X, et al. Three-dimensional perception of orchard banana central stock was enhanced by adaptive multi-vision technology[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2020, 174: 105508.
- [12] Kang H W, Chen C. Fruit detection, segmentation, and 3D visualization of environments in apple orchards[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2020, 171: 105302.
- [13] Kowshik K S, Manuela Z S. The estimation of chlorophyll content in banana during shelf life using a LiDAR laser scanner[J]. Postharvest Biology and Technology, 2022, 192: 112011.
- [14] Xiong Y, Ge Y, From P J. An obstacle separation method for the robotic picking of fruits in clusters[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2020, 175: 105397.
- [15] Misimi E, Øye E R, Eilertsen A, et al. GRIBBOT-Robotic 3D vision-guided harvesting of chicken filets[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2016, 121: 84-100.
- [16] 文朝武, 龙洁花, 张宇, 等. 基于 3D 视觉的番茄授粉花朵定位方法[J]. 农业机械学报, 2022, 53(8): 320-328.  
When C W, Long J H, Zhang Y, et al. Positioning method of tomato pollination flowers based on 3D vision [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(8): 320-328.
- [17] Zuo C, Feng S J, Huang L, et al. Phase-shifting algorithms for fringe projection profilometry: a review[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2018, 109: 23-59.
- [18] Zhang S, Huang P S. Novel method for structured light system calibration[J]. Optical Engineering, 2006, 45(8): 083601.
- [19] 刘金锦, 李浩军. 基于点云切片改进法的不规则物体体积测量[J]. 光学学报, 2021, 41(23): 2312003.  
Liu J, Li H J. Volume measurement of irregular objects based on an improved point cloud slicing method[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(23): 2312003.
- [20] Tsai R Y, Lenz R K. A new technique for fully autonomous and efficient 3D robotics hand/eye calibration [J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 1989, 5(3): 345-358.
- [21] Zhang Z Y. A flexible new technique for camera calibration[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2000, 22(11): 1330-1334.