

基于双目结构光三维重建的类球形水果外形指标测量

陈旭佳, 彭羽萌, 俞盛旗, 胡 栋*

(浙江农林大学光机电工程学院, 杭州 311300)

摘要: 水果外形指标的准确获取, 如畸形指数、体积、最大直径等, 是实现水果品质分级的重要前提。该研究搭建了一套双目结构光成像系统, 经过系统验证后用于获取类球形水果(苹果、柑桔、梨)表面的轮廓信息, 结合单视角和多视角点云重建实现三维形貌重构, 并在此基础上提取其外形指标。试验结果表明, 基于三维重建的标准件外形尺寸测量的相对误差在4%以内; 以人工测量结果为参考, 该研究所测苹果畸形指数 R^2 值为0.97, 所测类球形水果的体积与最大直径的 R^2 值分别为0.99和0.92。该研究提出的基于双目结构光三维重建方法可以准确地测量畸形指数、体积、最大直径等类球形水果的外形指标, 为其产后品质检测与分级提供重要参考。

关键词: 三维重建; 双目结构光; 类球形水果; 畸形指数; 体积; 最大直径

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202405154

中图分类号: S126

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2024)-20-0187-08

陈旭佳, 彭羽萌, 俞盛旗, 等. 基于双目结构光三维重建的类球形水果外形指标测量[J]. 农业工程学报, 2024, 40(20): 187-194. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202405154 <http://www.tcsae.org>

CHEN Xujia, PENG Yumeng, YU Shengqi, et al. Measuring the appearance indicators of spherical fruits using binocular structured light 3D reconstruction[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2024, 40(20): 187-194. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202405154 <http://www.tcsae.org>

0 引言

中国是全球水果生产的第一大国。2023年中国水果产量达到32 744.28万t, 其中类球形水果如苹果(4 960.17万t)、柑桔(6 433.76万t)、梨(1 985.26万t), 分别占全国水果产量的15.15%、19.65%和6.06%, 总计40.86%^[1]。水果品质分级是水果商品化的重要环节, 其中水果的外形指标, 如直径、体积等, 是实现水果分级的重要指标^[2]。计算机视觉技术具有操作简单、非接触等优点, 通过采集二维图像实现外形指标测量, 是获取水果表面信息的常用方法之一^[3]。ZHANG等^[4]采用低成本的成像系统采集苹果的二维图像, 获取苹果的大小、颜色等信息, 以此剔除劣质苹果; MANSURI等^[5]通过计算机视觉技术分别确定了泰国苹果的长度、直径、周长等物理特性, 并在此基础上估算苹果体积。

与传统的二维图像相比, 三维图像具有丰富的深度信息, 能更准确地提取对象的外形指标^[6-9]。张光龙等^[10]提出了一种使用激光与工业面阵相机相结合的水果外形测量方法, 通过激光扫描与计算机图像处理获得水果三维点云图像, 在此基础上提取水果外形尺寸; MIRBOD等^[11]提出了一种基于立体视觉和深度学习的方法用于估

计树上苹果果实大小, 通过训练深度神经网络检测水果尺寸, 并且完善被遮挡的水果区域, 利用立体相机的空间分辨率和深度信息, 将分割的水果形状转换为表面积和直径; 王传宇等^[12]采用双目相机, 并照射结构光获取玉米叶片边缘与叶脉点的三维信息, 实现玉米叶片的三维重建。李百明等^[13]研发了一种多视角自动成像系统, 通过安装在成像臂上的多个相机在不同视角获取的图像实现作物的点云重建。

在众多的三维重建方法中, 双目结构光技术原理简单、成本低、准确度高, 在三维重建中应用广泛^[14]。水果的体积和最大直径是常用的外部品质分级指标^[15], 而畸形指数, 作为苹果外形指标, 是实现苹果分级的重要参数^[16]。目前国内外对苹果畸形指数提取的研究甚少, 然而, 畸形指数作为苹果品质分级的一个重要的指标, 在苹果行业受到越来越多的关注。因此, 本文旨在通过双目视觉结合结构光成像为苹果畸形指数和3种类球形水果的体积及最大直径测量提供一种方便、准确、有效的方法, 具体研究目标包括: 1) 搭建双目结构光系统, 并采用标准件进行系统验证; 2) 提出一种适用于类球形水果的三维重建方法, 实现水果单视角与多视角三维点云重建; 3) 提取苹果畸形指数, 以及苹果、梨、柑桔的体积和最大直径。

1 原理与方法

1.1 双目视觉成像原理

图1为双目视觉的原理示意图。两个相机处于平行状态, 相机系统的对应坐标轴完全平行, 两个镜头的像

收稿日期: 2024-05-21 修订日期: 2024-09-14

基金项目: 国家自然科学基金项目(32371987, 32001414); 浙江省教育厅一般科研项目(Y202353696)

作者简介: 陈旭佳, 研究方向为结构光三维重建。

Email: 2023612021001@stu.zafu.edu.cn

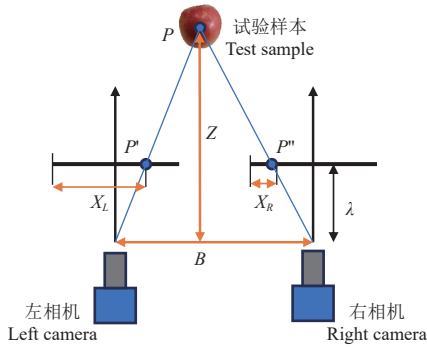
*通信作者: 胡栋, 博士, 副教授, 研究方向为农林信息感知与智能检测及装备。Email: 20180047@zafu.edu.cn

素焦距均为 λ , 其中心连线为基线 B , λ 和 B 可以由相机标定得到; P 为被测目标上的一点, P 在左右两个相机上的投影分别表示为 P' (X_L , y)、 P'' (X_R , y), 则点 P 到两相机成像平面的距离 Z 为这一点的深度。根据相似三角原理可以得到点 P 的深度 Z ^[17]:

$$\frac{B}{Z} = \frac{B + X_R - X_L}{Z - \lambda} \quad (1)$$

$$Z = \frac{B\lambda}{X_L - X_R} = \frac{B\lambda}{d} \quad (2)$$

式中, X_L 与 X_R 分别为点 P 在左右相机投影点的横坐标, d 为视差, 是被测目标上的一点在两个相机上的投影点的水平距离之差。因此, 通过计算视差图就能实现被测目标的三维重建。



注: P 为被测样本上的一点; P' 、 P'' 分别为 P 在左右相机上的投影; X_L 为 P' 在左相机图像上的横坐标; X_R 为 P'' 在右相机图像上的横坐标; λ 为左右相机镜头的像素焦距; Z 为 P 到左右相机成像平面的距离, mm; B 为左右相机光学中心的基线距离, mm。

Note: P is a point of the sample; P' and P'' are the projections of P on the left and right cameras, respectively; X_L is the horizontal axis of P' on the left camera image; X_R is the horizontal axis of P'' on the right camera image; λ is the pixel focal length of the left and right camera lenses; Z is the distance from P to the imaging planes of the left and right cameras, mm; B is the baseline distance of the optical centers between the left and right cameras, mm.

图 1 双目视觉原理示意图

Fig.1 Schematic diagram of binocular vision principle

1.2 水果的点云重建

1.2.1 单视角点云重建

在实际情况下, 双目相机难以处于完全平行且共面的理想状态, 左右相机所拍摄的图像并不平行。如图 2a 所示, 左相机拍摄图片中的一点在右相机拍摄图片中寻找对应匹配点时, 求解所需时间较长, 导致效率低下, 因此需要进行极线校正^[18]。极线校正后的图像如图 2b 所示。在校正后的图像中, 被测目标在左右相机图像中的对应点所在的极线处于同一水平线上, 匹配点的搜索范围从二维平面转换成了一维极线, 大大提高了匹配的效率和准确性。

双目视觉通过立体匹配求取目标匹配点的视差以实现三维重建^[19]。然而, 苹果等类球形水果的表面纹理单一, 在立体匹配时仅依靠水果表面特征难以保证其精确性。因此, 引入结构光法^[20-21], 使双目系统在原有的基础上增加了投射结构光的投影仪, 并结合相移法, 实现更精准、更可靠的三维重建, 其流程主要包括三步相移法求包裹相位、多频外差法求绝对相位、立体匹配、视

差优化和点云计算。

三步相移法求包裹相位: 结构光投影仪向被测目标投射初相位不同的编码图案, 通过双目相机采集图像, 经数据处理获得图像中每一像素点的相位信息。

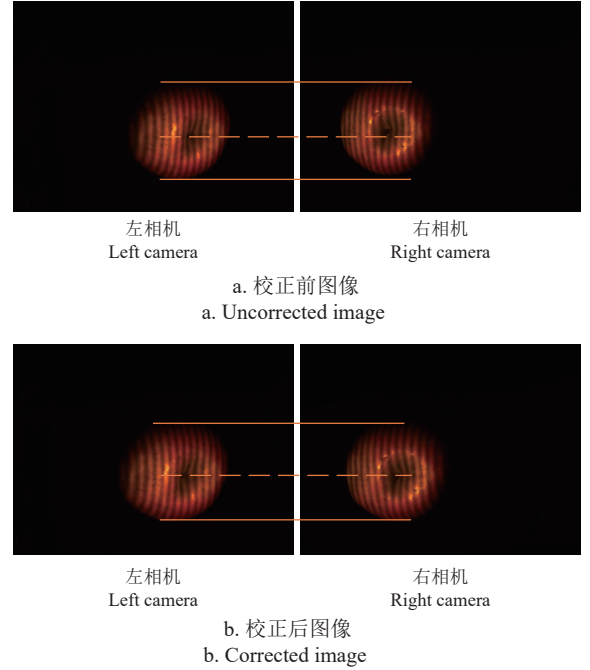


图 2 极线校正效果图

Fig.2 Polar line correction effect diagram

投射的结构光光强分布可以表示为

$$I(x, y) = A(x, y) + B(x, y) \cdot \cos(\varphi(x, y) + \alpha) \quad (3)$$

式中, $I(x, y)$ 表示像素 (x, y) 坐标上的光强, $A(x, y)$ 表示平均光强, $B(x, y)$ 表示调制幅度, $\varphi(x, y)$ 表示需要求解的相位值, α 表示初相位。令初相位 α 分别为 0 、 $2\pi/3$ 、 $4\pi/3$, 则 3 张结构光条纹图案光强分布 I_0 、 I_1 、 I_2 可分别表示为

$$\begin{cases} I_0(x, y) = A(x, y) + B(x, y) \cdot \cos(\varphi(x, y)) \\ I_1(x, y) = A(x, y) + B(x, y) \cdot \cos(\varphi(x, y) + 2\pi/3) \\ I_2(x, y) = A(x, y) + B(x, y) \cdot \cos(\varphi(x, y) + 4\pi/3) \end{cases} \quad (4)$$

将式 (4) 中 3 个方程联立, 可求解得到 $\varphi(x, y)$:

$$\varphi(x, y) = \arctan\left(\frac{I_0 - I_2}{2I_1 - I_0 - I_2}\right) \quad (5)$$

多频外差求绝对相位: 由上述三步相移法获得的相位具有相位跳跃情况, 称为包裹相位^[22]。为了消除相位跳跃, 得到连续的绝对相位, 需要进行相位展开。本文采用基于多频外差原理的时间相位展开法, 多频外差是将两个不同频率的条纹叠加得到更低频率的条纹^[23-24]。以双频外差为例, 两个不同频率的相对相位 φ_1 和 φ_2 进行叠加的过程可以表示为:

$$\varphi_{12} = \begin{cases} \varphi_1 - \varphi_2, \varphi_1 > \varphi_2 \\ \varphi_1 - \varphi_2 + 2\pi, \varphi_1 \leq \varphi_2 \end{cases} \quad (6)$$

式中, φ_{12} 为相对相位 φ_1 和 φ_2 的外差, φ_1 展开后的绝对相位 Φ_1 可由式 (7) 计算得到:

$$\Phi_1 = \varphi_1 + 2\pi \cdot \text{round} \left[\left(\frac{T_2}{T_1 - T_2} \varphi_{12} - \varphi_1 \right) / 2\pi \right] \quad (7)$$

式中, round 是四舍入函数, T_1 、 T_2 分别为 φ_1 与 φ_2 的周期。

本文采用三频外差原理进行相位计算, 根据相机分辨率选择的条纹频率 f_1 、 f_2 、 f_3 分别为 1/64、1/56、1/49。

立体匹配与视差优化: 在经过极线校正、三步相移以及相位展开后, 需将左右相机获得的相位图进行立体匹配以计算视差值。以左相机获得的相位图上的点为目标, 沿极线在右相机获得的相位图上寻找匹配点, 匹配点以最小匹配代价确定, 其计算方法为:

$$C(x, y, d) = \begin{cases} 0, p'(x, y) = 0 \\ |p'(x, y) - p''(x + d, y)| \end{cases} \quad (8)$$

式中, $C(x, y, d)$ 为代价矩阵, d 为 $p'(x, y)$ 的视差值, $p'(x, y)$ 与 $p''(x, y)$ 分别是左绝对相位与右绝对相位。之后, 采用左右一致性法、亚像素拟合以及中值滤波来进一步提高视差图精度。视差的最终优化结果如图 3a 所示。

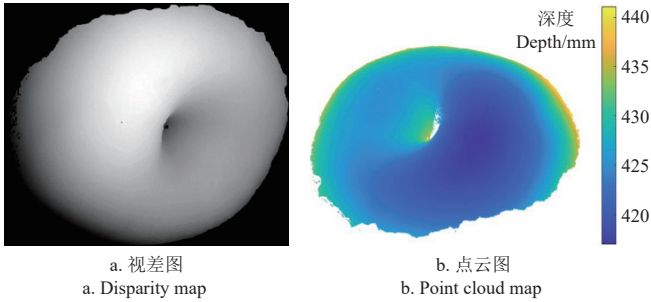


图 3 最终视差图与点云图

Fig.3 Final disparity map and point cloud map

点云计算: 在得到最终的视差图后, 可以根据三角测量原理计算最终视差图中每一个像素点 (u, v) 的三维坐标 (x, y, z) , 计算式为:

$$\begin{cases} z = \frac{B\lambda}{D_s} \\ x = \frac{uz}{\lambda} \\ y = \frac{vz}{\lambda} \end{cases} \quad (9)$$

式中, B 为左右相机光心的距离, λ 为相机的像素焦距, D_s 为最终优化后的视差。得到每一个像素点的三维坐标, 意味着最终的点云图已完成, 其结果如图 3b 所示。

1.2.2 基于旋转台的多视角点云配准

基于单视角的点云重建可用于获取苹果的畸形指数。但是, 该点云的数量较少, 获取水果的体积和直径等外形指标的误差较大。因此, 本文基于旋转台进行多视角点云重建, 并匹配多视角点云图像, 以此获取较为完整的水果点云模型。

原始点云图像点云数量庞大, 将极大影响后续的配准效率, 在进行点云配准之前, 对点云图像进行优化。本文采用 PCL 中的 VoxelGrid 下采样函数, 在减少点云数量的同时对外形精度的影响较小, 从而提高后续算法的效率。如图 4 所示, 进行下采样处理后, 点云的数量

从 536 027 减少为 13 602, 处理后的点云数量仅为处理前的 2.5%, 且点云图像外形几乎没有改变。

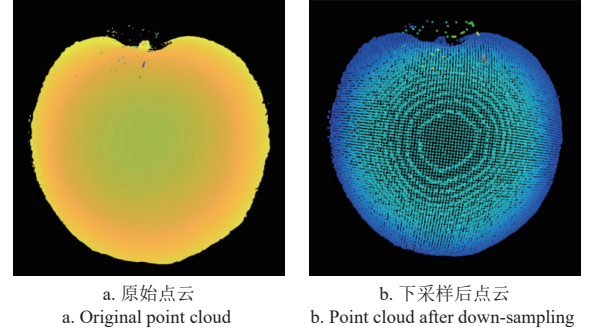


图 4 点云图像采样前后对比

Fig.4 Comparison of point cloud images before and after down-sampling

在点云配准的过程中, 将水果放在旋转台上进行扫描, 每次旋转 30° (共扫描 12 次), 之后将不同视角的点云图像匹配到同一个坐标轴下。

手动光学旋转台能实现 360° 旋转, 在试验前对旋转台进行标定。首先, 在旋转台不同位置粘贴 5 个圆形标记, 之后使用双目结构光系统从初始 0° 位置开始每 30° 采集一次图像共采集 12 次, 并对每个位置的标记点进行三维重建; 然后, 使用 RANSAC 算法拟合每个旋转角度下标记点的圆心; 最后, 使用奇异值分解方法 (singular value decomposition, SVD) [25] 计算初始位置到各个角度的旋转矩阵 R 与平移矩阵 T 。

不同视角点云图像的关系为:

$$P_0 = H_n P_n, n = 1, 2, 3, \dots$$

$$H_n = \begin{bmatrix} R & T \\ O & 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

式中, P_0 是水果初始位置的点云, P_n 是旋转台旋转 n 次后的点云, H_n 是经过旋转台标定后得出的旋转平移矩阵, R 为一个 3×3 的旋转矩阵, T 为一个 3×1 的平移矩阵。通过对式 (10) 求解实现不同水果点云的图像配准。在原有配准的基础上, 采用 ICP (iterative closest point) [26] 算法, 对点云进一步优化。

1.3 外形指标提取方法与评价指标

在获得水果的点云图像后, 通过算法提取外形指标。本文的研究对象为类球形水果, 选用了苹果、柑桔和梨 3 种水果作为代表, 测量其最大直径 D 、体积 V 、畸形指数 A 。其中, 前两个指标需要从多视角点云中提取得到, 提取过程中 3 种水果混合在一起; 而畸形指数 A 直接从单视角的重建点云中获取即可, 但只有苹果有该指标。

将苹果果茎朝上置于水平面上, 苹果的畸形指数为高端肩水平切面与低端肩水平切面之间的距离 [6]。图 5 为苹果畸形指数提取示意图。由于苹果端肩的法向量与平面上的 Z 轴基本平行, 因此可以根据法向量与 Z 轴的夹角 θ_i 在点云图像中求出端肩区域, 苹果的畸形指数 A 可以由式 (11) 计算得到:

$$A = \text{Max}(C_s) - \text{Min}(C_s) \quad (11)$$

式中, C_s 为苹果端肩区域点云图像; $\text{Max}(C_s)$ 表示算法获取的苹果端肩最高高度; $\text{Min}(C_s)$ 表示算法获取的苹果端肩最低高度。

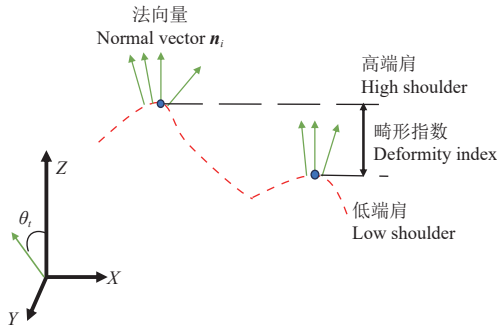


图 5 畸形指数提取示意图

Fig.5 Schematic diagram of extracting deformity index

对于类球形水果的体积, 由于通过多视角点云配准后的点云图像在底部有缺失, 为此将水果果梗部分的点云投影到底部以完善水果的点云图像, 其补全示意图如图 6a 所示, 最终完整点云图像 C_{all} 可由以下公式获得:

$$C_{add} = C_m, \theta_i = \cos^{-1} \left(\frac{n_i z}{|n_i| |z|} \right) < \beta \quad (12)$$

$$C_{all} = C + C_{xoy} \quad (13)$$

式中, C_{add} 是水果果梗位置的点云; C_m 是点云法向量夹角为 θ_i 的点云; β 是点云法向量与 Z 轴的最大夹角; C 是采用 ICP 算法优化后的水果点云图像; C_{xoy} 是 C_{add} 投影到 xoy 平面的补全点云。通过函数 `pcl::ConvexHull` 计算完整点云图像 C_{all} 的凸包, 最后由函数 `gefTotalvolume` 计算凸包体积得到水果的体积 V 。类球形水果的最大直径获取方法如图 6b 所示, 采用有向包围盒 OBB (oriented bounding box), 通过计算水果点云 OBB 包围盒的长度与宽度, 选取最大值作为水果的最大直径。

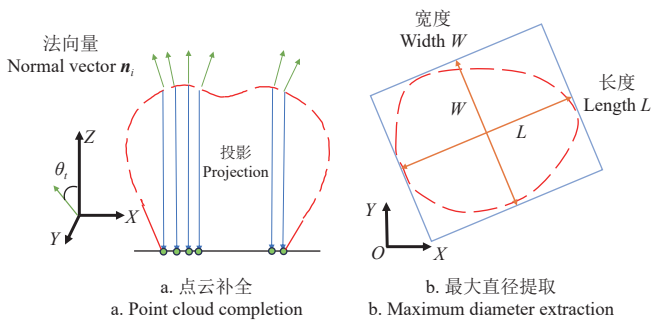


图 6 点云补全与最大直径提取示意图

Fig.6 Schematic diagram of point cloud completion and maximum diameter extraction

为了分析从重建点云中获取水果外形指标的准确性, 将人工测量结果作为参考值, 引入决定系数 R^2 、均方根误差 RMSE (root mean squared error)、平均绝对百分比误差 MAPE (mean absolute percentage error) 3 个参数作为评价指标。

1.4 双目结构光系统组成与样品准备

图 7 为双目结构光系统示意图与系统实物图。本系

统主要由两个工业相机 (型号 MER2-507-23GC, 分辨率 2592×1944)、两个镜头 (型号 HN-1216-5M-C2/3X, 焦距 12 mm)、一台投影仪 (型号 DLI CEL5500)、STM32 单片机、旋转台、载物台、计算机以及若干光学支撑件组成。两台相机之间的水平距离约为 240 mm, 相机到检测目标的距离约为 450 mm。系统有两种成像模式, 第一种模式是将样品放在载物台上, 进行单视角点云重建; 第二种是将样品通过两根钉子固定在旋转台上, 通过旋转台旋转拍摄不同视角图像进行多视角点云重建。图像采集在暗箱中完成, 以减小环境光对试验的影响。

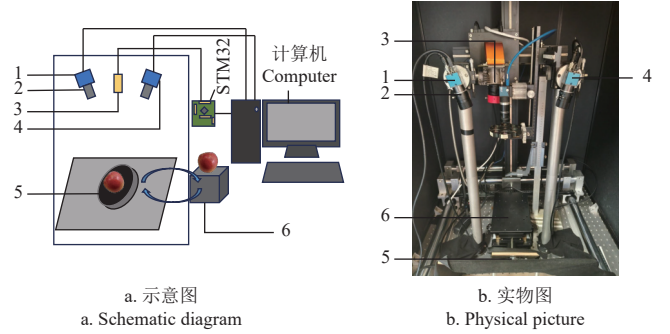


图 7 双目结构光系统示意图与实物图
Fig.7 Schematic diagram and physical picture of binocular structured light system

为了验证双目结构光系统的三维重建精度, 本文选用直径分别为 50、60、70、80 mm 的 4 个特氟龙球标准件进行系统验证。接着开展类球形水果三维重建试验, 从超市选购 81 个水果样本, 其中苹果 28 个, 柑桔 27 个, 梨 26 个, 在试验时将 3 种水果混合在一起。试验前, 人工测量每个水果获取其最大直径 D 、体积 V 以及苹果的畸形指数 A , 结果如表 1 所示。其中, 最大直径 D 与畸形指数 A 通过游标卡尺测量得到, 体积 V 通过排液法测量得到。

表 1 人工测量水果外形指标结果

Table 1 Results of manual measurements of fruit appearance

		indicator		
水果种类	指标	最小值	最大值	平均值
Fruit types	Index	Minimum value	Maximum value	Average value
苹果	畸形指数/mm	2.51	17.64	9.77
	体积/cm ³	210	380	289.00
	最大直径/mm	80.43	98.09	86.85
柑桔	体积/cm ³	128	310	191.22
	最大直径/mm	65.13	87.20	75.75
梨	体积/cm ³	215	366	264.54
	最大直径/mm	74.14	88.22	80.36

2 结果与分析

2.1 双目结构光系统精度验证

直径为 50、60、70、80 mm 的 4 个特氟龙球标准件的三维重建结果如表 2 所示。

从表中可以看出, 其重建直径分别为 51.66、59.12、70.50、79.60 mm, 相对误差为 3.32%、1.47%、0.71%

和 0.50%。结果表明基于双目结构光系统的三维重建精度较高，可以用于类球形水果的外形指标提取。

表 2 特氟龙球重建结果

Table 2 Reconstruction results of four Teflon balls			
标准件 Standard parts	实际直径 Actual diameter/mm	重建直径 Reconstructed diameter/mm	相对误差 Relative error/%
球 1 Ball 1	50	51.66	3.32
球 2 Ball 2	60	59.12	1.47
球 3 Ball 3	70	70.50	0.71
球 4 Ball 4	80	79.60	0.50

2.2 类球形水果指标提取结果

2.2.1 苹果的畸形指数

苹果畸形指数可直接从单视角点云中提取，其测量结果如图 8 所示。从图中可以看出，试验结果与人工测量之间的 R^2 为 0.97，RMSE 为 0.755 mm，MAPE 为 7.23%。进一步分析发现，大部分重建值都略高于人工测量值，其原因可能是：人工测量苹果畸形指数求的是面与面之间的差，而在点云重建中通过提取苹果端肩区域点云高低点求解畸形指数，求的是点与点之间的差值，点云中的最低点难以在人工测量时准确选取。图 8b 中个别点偏离较大，可能是因为苹果在图像采集过程中未完全稳定放平。

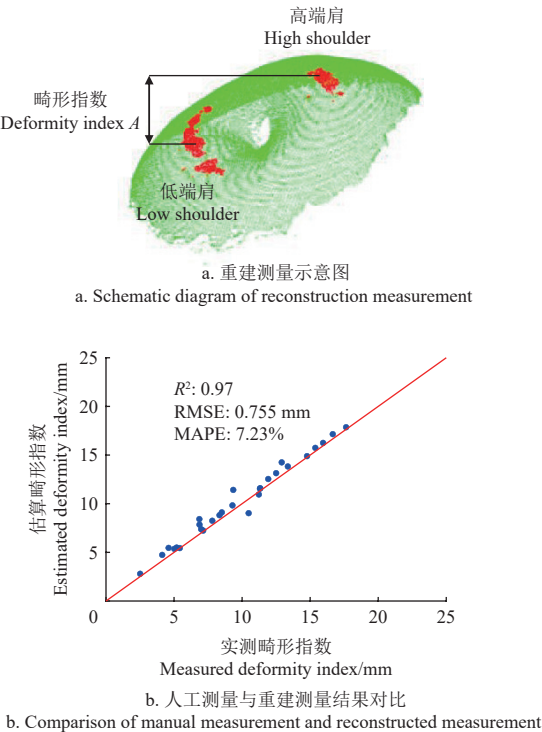


图 8 苹果畸形指数重建结果
Fig.8 Reconstruction results of apple deformity index

2.2.2 类球形水果的体积与最大直径

类球形水果的体积与最大直径从多视角点云中提取，其提取方法可视化如图 9 所示。不同水果的点云投影补全需要选取合适点云，这些点云的选取与式 (12) 中点云

法向量与 Z 轴的最大夹角 β 息息相关。本文基于预试验结果，在 36° 到 46° 的范围内寻求最优的 β 角。采用苹果、柑桔、梨各 10 个，通过不同 β 角度下的投影补全结果求得水果体积，将其与人工测量结果进行比较，并计算决定系数 R^2 ，结果如表 3 所示。可以看出，苹果、梨与柑桔分别在 β 角为 40° 、 41° 与 45° 时 R^2 最大，说明体积预测效果最佳。为了增加算法的适用范围，且梨在 40° 与 41° 时的 R^2 相差不大，因此在计算苹果与梨的体积时 β 角取 40° ，计算柑桔体积时 β 角取 45° 。

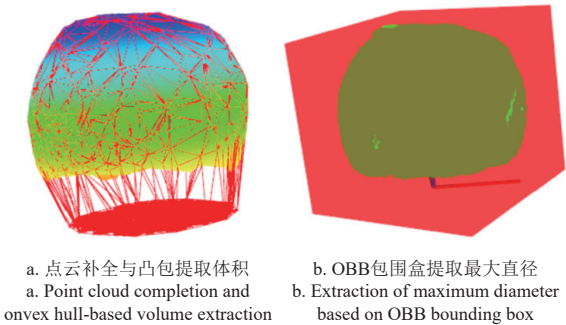


图 9 类球形水果重建提取体积与最大直径方法
Fig.9 Reconstruction and extraction of volume and maximum diameter method for spherical fruits

表 3 不同 β 角点云补全水果体积估算与人工测量结果的决定系数 (R^2)

Table 3 Coefficient of determination of fruit volume point cloud extraction and manual measurement results based on different β angle			
β ($^\circ$)	苹果 Apple	柑桔 Orange	梨 Pear
36	0.935	0.965	0.983
37	0.944	0.972	0.988
38	0.951	0.978	0.993
39	0.956	0.983	0.996
40	0.972	0.988	0.998
41	0.959	0.991	0.998
42	0.956	0.993	0.995
43	0.950	0.996	0.992
44	0.942	0.997	0.984
45	0.932	0.997	0.970
46	0.921	0.996	0.951

注： β 为点云法向量与 Z 轴的最大夹角，($^\circ$)。
Note: β is the maximum angle between the point cloud normal vector and the Z-axis, ($^\circ$).

图 10 为人工测量与点云重建提取 81 个类球形水果的体积与最大直径的结果对比。对于类球形水果的体积， R^2 为 0.99，RMSE 为 6.015 cm^3 ，MAPE 为 1.946%；对于最大直径， R^2 为 0.92，RMSE 为 1.823 mm，MAPE 为 1.859%。通过结果图可以发现，对于类球形水果的体积，点云重建与人工测量的结果非常吻合。然而，对于最大直径，图中的数据点大多都在线下方，表示基于点云重建的最大直径略小于人工测量结果。造成这种现象的可能原因是，基于 ICP 算法进行点云配准时，水果点云有点向内收缩。最大直径的预测误差并未影响水果体积的估算，究其原因，可能是因为水果体积估算需要先对点云图像进行补全，而补全后的水果点云图像的底部是水平的，没有实际情况中的弧面或凹陷，反而导致这部分

多出来的体积与点云图像的收缩形成互补,使基于点云重建的体积接近人工测量结果。

进一步将本文的研究结果与其他文献的结果进行对比(表4)发现:本文对类球形水果的体积和最大直径预测结果的 R^2 都高于0.92,接近或略高于其他文献的结果,其中体积的 R^2 达到了0.99,与XIE等^[27]基于三维重建测量胡萝卜的体积结果($R^2=0.993$)相差不大,且明显好于多数其他文献结果。

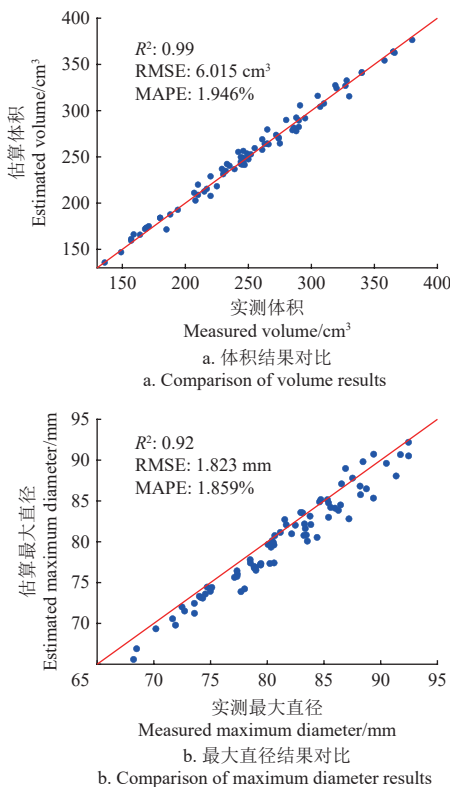


图10 类球形水果体积与最大直径的人工测量与点云估算结果对比
Fig.10 Comparison of manual measurement and point cloud estimation results for the volume and maximum diameter of spherical fruits

表4 与其他文献三维重建结果对比

Table 4 Comparison with the results of other literature				
种类 Type	评价指标 Evaluating indicator	最大直径 Maximum diameter	体积 Volume	参考文献 Reference
杏鲍菇 <i>Pleurotus eryngii</i>	R^2	—	0.966	[28]
	RMSE	—	12.89 cm ³	
葡萄 Grape	R^2	—	0.830	[29]
	RMSE	—	0.18 cm ³	
花椰菜 Cauliflower	R^2	—	0.861	[30]
	RMSE	—	19.57 cm ³	
胡萝卜 Carrot	R^2	0.933	0.993	[27]
	RMSE	1.54 mm	6.07 cm ³	
苹果 Apple	R^2	0.948	0.967	[31]
	RMSE	1.74 mm	0.03 mm	
甜瓜 Melon	R^2	—	0.997	[32]
	RMSE	—	3.77 cm ³	
类球形水果 Spherical fruits	R^2	0.92	0.99	本文结果
	RMSE	1.82 mm	6.01 cm ³	

需要指出的是,本文所测类球形水果包含苹果、柑桔、梨3种水果,虽然都是类球形水果,但是外形等特

征均有所差异,与其他文献针对单一种类样本重建提取外形指标的结果对比,证明了本文所提出的方法适用于大部分球形水果,能实现水果外形指标的准确测量。

3 结 论

本文采用双目视觉技术,结合结构光成像,开展类球形水果的三维重建研究,并从中提取外形指标。首先构建了双目结构光系统,并对其进行极线校正,通过三步相移法求包裹相位、多频外差法求绝对相位、立体匹配、视差优化和点云计算,实现单视角点云重建,并从中提取苹果特有的畸形指数;通过基于旋转台的多视角点云匹配策略,实现更为精准的多视角点云重建,提取类球形水果的最大直径和体积。基于标准件的系统验证结果表明,三维重建的相对误差在3.32%以内。将水果的重建结果与人工测量进行相比,苹果畸形指数的 R^2 为0.97,所测类球形水果的体积与直径的 R^2 分别为0.99和0.92。本文提出的基于双目结构光的三维重建可实现苹果畸形指数与不同种类的类球形水果体积与最大直径的有效准确测量。

[参 考 文 献]

[1] 国家数据[EB/OL]. (2024-06-20) [2024-09-02]. <https://data.stats.gov.cn>.

[2] GHAZAL S, QURESHI W, KHAN U, et al. Analysis of visual features and classifiers for fruit classification problem[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2021, 187: 106267.

[3] 刘恩泽, 吴文福. 基于综合指标品质评价算法的单色水果生长状态检测互联网架构[J]. *吉林大学学报(工学版)*, 2019, 49(6): 2019-2026.

LIU Enze, WU Wenfu. Monochrome fruit growth detection internet architecture based on comprehensive indicator quality evaluation algorithm[J]. *Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition)*, 2019, 49(6): 2019-2026. (in Chinese with English abstract)

[4] ZHANG Z, LU Y, LU R. Development and evaluation of an apple infield grading and sorting system[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2021, 180: 111588.

[5] MANSURI S, GAUTAM P, JAIN D, et al. Computer vision model for estimating the mass and volume of freshly harvested Thai apple ber (*Ziziphus mauritiana* L.) and its variation with storage days[J]. *Scientia Horticulturae*, 2022, 305: 111436.

[6] YU S, YAN X, JIA T, et al. Binocular structured light-based 3D reconstruction for morphological measurements of apples[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2024, 213: 112952.

[7] 叶敏, 邹湘军, 罗陆锋, 等. 荔枝采摘机器人双目视觉的动态定位误差分析[J]. *农业工程学报*, 2016, 32(5): 50-56.

YE Min, ZOU Xiangjun, LUO Lufeng, et al. Error analysis of dynamic localization tests based on binocular stereo vision on litchi harvesting manipulator[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2016, 32(5): 50-56. (in Chinese with English abstract)

- [8] 翟志强, 熊坤, 王亮, 等. 采用双目视觉和自适应 Kalman 滤波的作物行识别与跟踪[J]. 农业工程学报, 2022, 38(8): 143-151.
ZHAI Zhiqiang, XIONG Kun, WANG Liang, et al. Crop row detection and tracking based on binocular vision and adaptive Kalman filter[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2022, 38(8): 143-151. (in Chinese with English abstract)
- [9] 宫金良, 刘镔霄, 魏鹏, 等. 基于相机位姿恢复与神经辐射场理论的果树三维重建方法[J]. 农业工程学报, 2023, 39(22): 157-165.
GONG Jinliang, LIU Binxiao, WEI Peng, et al. Three-dimensional reconstruction of reconstructing fruit tree images using camera pose recovery and neural radiance fields theory[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2023, 39(22): 157-165. (in Chinese with English abstract)
- [10] 张光龙, 张建伟, 周敬. 一种基于线激光的水果外形检测方法[J]. 中国农机化学报, 2020, 41(1): 161-166.
ZHANG Guanglong, ZHANG Jianwei, ZHOU Jing. A method of fruit shape detection based on line laser[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2020, 41(1): 161-166. (in Chinese with English abstract)
- [11] MIRBOD O, CHOI D, HEINEMANN P H, et al. On-tree apple fruit size estimation using stereo vision with deep learning-based occlusion handling[J]. Biosystems Engineering, 2023, 226: 27-42.
- [12] 王传宇, 赵明, 阎建河, 等. 基于双目立体视觉技术的玉米叶片三维重建[J]. 农业工程学报, 2010, 26(4): 198-202.
WANG Chuanyu, ZHAO Ming, YAN Jianhe, et al. Three-dimensional reconstruction of maize leaves based on binocular stereovision system[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2010, 26(4): 198-202. (in Chinese with English abstract)
- [13] 李百明, 吴茜, 吴劼, 等. 基于多视角自动成像系统的作物三维点云重建策略优化[J]. 农业工程学报, 2023, 39(9): 161-171.
LI Baiming, WU Qian, WU Jie, et al. Optimization of crop 3D point cloud reconstruction strategy based on the multi-view automatic imaging system[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2023, 39(9): 161-171. (in Chinese with English abstract)
- [14] 俞盛旗, 胡栋, 刘威. 基于视觉的光学三维重建技术及其在农作物信息感知中的应用[J]. 激光与光电子学进展, 2024, 61(4): 49-57.
YU Shengqi, HU Dong, LIU Wei. Vision-based optical 3D reconstruction and the application in crop information perception[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2024, 61(4): 49-57. (in Chinese with English abstract)
- [15] SUN Z, HU D, ZHOU T, et al. Development of a multispectral spatial-frequency domain imaging system for property and quality assessment of fruits and vegetables[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2023, 214: 108251.
- [16] QIU D, GUO T, YU S, et al. Classification of apple color and deformity using machine vision combined with CNN[J]. Agriculture, 2024, 14(7): 978.
- [17] 顾宝兴, 刘钦, 田光兆, 等. 基于改进 YOLOv3 的果树树干识别和定位[J]. 农业工程学报, 2022, 38(6): 122-129.
GU Baoxing, LIU Qin, TIAN Guangzhao, et al. Recognizing and locating the trunk of a fruit tree using improved YOLOv3[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2022, 38(6): 122-129. (in Chinese with English abstract)
- [18] LI D, XIAO L, WEI H, et al. Spatial-temporal measurement of waves in laboratory based on binocular stereo vision and image processing[J]. Coastal Engineering, 2022, 177: 104200.
- [19] TIAN X, LIU R, WANG Z, et al. High quality 3D reconstruction based on fusion of polarization imaging and binocular stereo vision[J]. Information Fusion, 2022, 77: 19-28.
- [20] LIU X, YANG L, CHU X, et al. A novel phase unwrapping method for binocular structured light 3D reconstruction based on deep learning[J]. Optik, 2023, 279: 170727.
- [21] 郑太雄, 黄帅, 李永福, 等. 基于视觉的三维重建关键技术研究综述[J]. 自动化学报, 2020, 46(4): 631-652.
ZHENG Taixiong, HUANG Shuai, LI Yongfu, et al. Key techniques for vision based 3D reconstruction: a review[J]. Acta Automatica Sinica, 2020, 46(4): 631-652. (in Chinese with English abstract)
- [22] 侯艳丽, 梁瀚钢, 李付谦, 等. 相位测量轮廓术中时空结合的三频相位展开[J]. 光学学报, 2022, 42: 178-186.
HOU Yanli, LIANG Hangang, LI Fuqian, et al. Spatial-temporal combined phase unwrapping in phase measurement profilometry[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42: 178-186. (in Chinese with English abstract)
- [23] CHEN Z, HU T, HAO Y, et al. High-speed phase structured light integrated architecture on FPGA[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2023, 71(1): 1017-1027.
- [24] WANG J, YANG Y. Phase extraction accuracy comparison based on multi-frequency phase-shifting method in fringe projection profilometry[J]. Measurement, 2022, 199: 111525.
- [25] DE-CASTRO E, MORANDI C. Registration of translated and rotated images using finite Fourier transforms[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1987(5): 700-703.
- [26] BESL P, MCKAY N. A Method for registration of 3-D shapes[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1992, 14(2): 239-256.
- [27] XIE W, WEI S, YANG D. Morphological measurement for carrot based on three-dimensional reconstruction with a ToF sensor[J]. Postharvest Biology and Technology, 2023, 197: 112216.
- [28] LUO S, TANG J, PENG J, et al. A novel approach for

- measuring the volume of *Pleurotus eryngii* based on depth camera and improved circular disk method[J]. *Scientia Horticulturae*, 2024, 336: 113382.
- [29] IVORRA E, SÁNCHEZ A J, CAMARASA J G, et al. Assessment of grape cluster yield components based on 3D descriptors using stereo vision[J]. *Food Control*, 2015, 50: 273-282.
- [30] ANDUJAR D, RIBEIRO A, FERNANDEZ-QUINTANILLA C, et al. Using depth cameras to extract structural parameters to assess the growth state and yield of cauliflower crops[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2016, 122: 67-73.
- [31] MA H, ZHU X, JI J. et al. Rapid estimation of apple phenotypic parameters based on 3D reconstruction[J]. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 2021, 14(5): 180-188.
- [32] HONG S, KIM J, LEE A. Real-time morphological measurement of oriental melon fruit through multi-depth camera three-dimensional reconstruction[J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11947-024-03435-8>.

Measuring the appearance indicators of spherical fruits using binocular structured light 3D reconstruction

CHEN Xujia , PENG Yumeng , YU Shengqi , HU Dong*

(College of Optical, Mechanical and Electrical Engineering, Zhejiang A & F University, Hangzhou 311300, China)

Abstract: Three typical types of spherical fruits, namely apples, oranges, and pears, have accounted for 40.86 % of the total fruit production in China in 2023. However, there is a huge trade deficit in the import and export trade of fruits in China. Furthermore, grading technology has limited the largest production and consumption of fruits. Appearance indicators, such as size, volume and deformity index, are the main external quality traits of fruits in commercial grading lines. Alternatively, computer vision has been widely used in the field of nondestructive detection of fruits and vegetables, due to the simple operation, non-contact and low cost. The surface information can be obtained to measure the external indicators using two-dimensional images. However, some limitations are still remained to capture the detailed appearance indicators, especially in the high-accuracy measurement. Compared with traditional two-dimensional images, three-dimensional (3D) imaging with the depth information can be beneficial to the appearance indicators of fruits. Among them, binocular structured light is the promising 3D reconstruction with the cost-saving, high-precision and non-contact extraction. This study focuses on spherical fruits, selecting apple, orange, and pear as representative examples, with the aim of constructing binocular structured light imaging to obtain surface contour information. The system was also validated using standard samples. Single-view point cloud reconstruction was performed as well. Three-step phase shifting was used to determine the wrapped phase. While multi-frequency heterodyne was applied to determine the absolute phase. Afterwards, stereo matching, disparity optimization, and point cloud calculation were conducted to obtain a 3D point cloud map. A rotary table was utilized to match the point cloud images from different perspectives to the same coordinate axis. Coarse point cloud registration was also achieved. A complete point cloud was obtained to conduct more precise registration using the iterative closure point (ICP) to obtain. Finally, the 3D reconstruction of spherical fruits was realized. The deformity index of the apple was extracted from the reconstruction image of single-view point cloud using normal vector angle. According to the normal vector angle, the point cloud of the fruit stem position was projected to the bottom of the fruit point cloud image. The complete fruit point cloud was improved to calculate the convex hull of the point cloud for the volume of fruit. The maximum fruit diameter was extracted through oriented bounding box (OBB) bounding box. The experimental results show that the relative error was within 4% in the external dimensions of standard parts using 3D reconstruction. Taking manual measurement as the references, the values of coefficient of determination (R^2), root mean squared error (RMSE), and mean absolute percentage error (MAPE) were 0.97, 0.755 mm, and 7.23%, respectively, for the measured apple deformity index. In the volume of spherical fruits, R^2 was 0.99, RMSE was 6.015 cm³, and MAPE was 1.946%, while those were 0.92, 1.823 mm, and 1.859%, respectively, for the maximum diameter. The 3D reconstruction with binocular structured light can be expected to significantly enhance the accuracy and efficiency in the appearance indicators of spherical fruits. The finding can also provide a valuable tool to improve fruit quality control and grading.

Keywords: 3D reconstruction; binocular structured light; spherical fruit; deformity index; volume; maximum diameter.