doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.12.002

基于 SR300 深度相机的褐蘑菇原位测量技术

王　玲[1,2]　徐　伟[1]　杜开炜[1]　卢　伟[1,2]　朱家豪[1]　张　俊[1]

(1.南京农业大学工学院，南京 210031；2.江苏省现代设施农业技术与装备工程实验室，南京 210031)

摘要：褐蘑菇工厂化种植模式下，为了给蘑菇采摘机器人提供工作参数，采用结构光 SR300 深度相机采集菇床图像送入工控机进行原位测量。针对菇床上褐蘑菇的菌丝干扰背景，在深度图像中利用土壤表面深度的众数，结合蘑菇菌柄至少 20 mm 的高度，自适应选择动态阈值，从菇床背景中提取蘑菇菌盖二值图；针对粘连的类圆形蘑菇，基于 2－1 圆形 Hough 变换初步检测其圆心、半径，进一步对蘑菇的边界点进行跟踪、去噪、插补，分割粘连的蘑菇，准确拟合单体蘑菇边界，获取蘑菇圆心和边界点的三维坐标；校准相机坐标系并基于陶瓷圆板验证原位测量方法的精度，由此计算世界坐标系中单体蘑菇的位置、直径、偏向角、倾斜角。现场试验表明，蘑菇直径最大误差为 5.57 mm，倾斜角最大误差为 6.3°，视频帧的运行时间为 206 ms，单体蘑菇的运行时间为 44 ms，可满足蘑菇采摘机器人的现场需求。

关键词：褐蘑菇；SR300 深度相机；背景分割；粘连蘑菇；原位测量

中图分类号：TP317.4　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1000-1298(2018)12-0013-07

Portabella Mushrooms Measurement in Situ Based on SR300 Depth Camera

WANG Ling[1,2]　XU Wei[1]　DU Kaiwei[1]　LU Wei[1,2]　ZHU Jiahao[1]　ZHANG Jun[1]

(1. *College of Engineering*, *Nanjing Agricultural University*, *Nanjing* 210031, *China*

2. *Engineering Laboratory of Modern Facility Agriculture Technology and Equipment in Jiangsu Province*, *Nanjing* 210031, *China*)

Abstract: In factory-like planting pattern of Portabella mushrooms, aiming to provide working parameters for mushroom picking robot, mushroom bed images were collected into the industrial personal computer (IPC) to measure in situ by structured light 3D camera-SR300. For complex background of plenty of hyphae in mushroom bed, the dynamic threshold was calculated adaptively by the mode of depth data of soil surface combined to at least 20 mm of stipe height, and the binary image of mushroom caps were extracted from mushroom bed background. For adhesion and quasi-circular mushrooms, the centric coordinates and radius were detected roughly based on the 2 − 1 cyclo-Hough transform, and then the boundaries of mushrooms were tracked, denoised and interpolated to segment adhesion mushrooms and fit a single mushroom exactly. And the three-dimensional coordinates of the centric and the boundary points of a single mushroom were calculated. By the coordinate system calibration of camera, the measurement accuracy in site was verified by using a ceramic disk. The location, diameter and deviation-lean angle of a single mushroom were calculated in world coordinate system of the camera. Field test results showed that the maximum diameter error of a mushroom was 5.57 mm, the maximum lean angle error of a mushroom was 6.3°. The mean run time of a video frame was 206 ms, and the mean run time of a single mushroom was 44 ms, which can meet the scene requirement of the mushroom picking robot.

Key words: Portabella mushroom; SR300 depth camera; background segmentation; adhesion mushroom; measurement in situ

0　引言

褐蘑菇是一种名贵的高蛋白、低脂肪、无胆固醇、色味俱全、药食兼优的美味食用菌[1]，价格昂贵，市场缺口很大。根据菇形大小，褐蘑菇可分为大褐菇(Portabella)与小褐菇(Crimini)，其价格与蘑菇

收稿日期：2018－05－12　修回日期：2018－07－17

基金项目：江苏省农机三新工程项目(SZ120170036)和扬州市重点研发项目(现代农业)(YZ2018038)

作者简介：王玲(1966—)，女，副教授，博士，主要从事机器视觉技术研究，E-mail：Lingw@njau.edu.cn

的直径大小有关,因此,褐蘑菇种植企业需要选择性采摘特定尺寸的蘑菇。目前国内外均采用人工方式采摘褐蘑菇,费工费时、成本高、劳动强度大,急需研究一种能够替代人工进行蘑菇原位在线测量、采摘的智能蘑菇采摘机器人设备。

现有的蘑菇图像分割、识别及定位研究都是基于二维彩色相机的。陈红等[2-4]针对流水线上蓝色背景的蘑菇,利用形状、纹理特征和模式识别算法实现了蘑菇的在线检测。周云山等[5]和俞高红等[6]利用苗床、蘑菇边界、蘑菇中心的灰度值逐渐增加的特点,考虑到蘑菇的中心不重叠,用一个较高的阈值搜索蘑菇的中心区域,然后由中心向某一方向搜索蘑菇的边界点,再沿着边界的切线方向搜索其余边界点,提取蘑菇的边界、周长、面积和中心坐标。可见,现有蘑菇图像的背景分割借助了苗床与蘑菇灰度的显著差异或人工背景,并且尚未进一步分割粘连的蘑菇,基于二维图像坐标系下定位的蘑菇并未转换到三维世界坐标系下。

近年来,由于果实的分割与检测对颜色空间高度敏感,针对光照条件不稳定并且果实与背景的颜色区分不显著的情形,基于有源测距获得的深度图像在高通量植物表型检测方面已逐渐显露出优势[7],基于农业场景深度信息采集玉米、草莓冠层、果树等植物表面的三维点云,实现了植物表面的三维重建[8-15],通过测量棉株、玉米、油菜花、甜椒的直径、高度、3D 曲面特征等株型参数来评价其生长状态和产量[16-20]。可见,与灰度图像相比,深度图像不受光照阴影及物体光滑表面纹理干扰,可以得到更可靠的果实几何信息,为实现田间果实图像的背景分割、识别及定位积累了丰富的经验。

本文针对褐蘑菇工厂化种植环境光照不均匀,菇床土壤中含有大量菌丝,菌丝不断地出茬、生长,蘑菇的灰度与土壤背景没有显著差异的情况,采用基于深度图像的背景分割方法,对蘑菇图像背景进行分割,进一步分割粘连的蘑菇,并测量蘑菇在世界坐标系下的位置、直径、倾斜角等。

1 图像采集设备与方法

以扬州奥吉特生物科技有限公司的褐蘑菇生产菇房为实验地,现场采集不同光源环境下的菇床深度视频流,总计 185 幅深度图像;其中,顶层光源下采集的 51 幅图像光照均匀、亮度较高,侧光源下采集的 60 幅图像光照不均匀,菇房中央采集的 74 幅图像光照较均匀、亮度较低。可见,工厂光照条件不稳定。视频采集现场如图 1 所示。

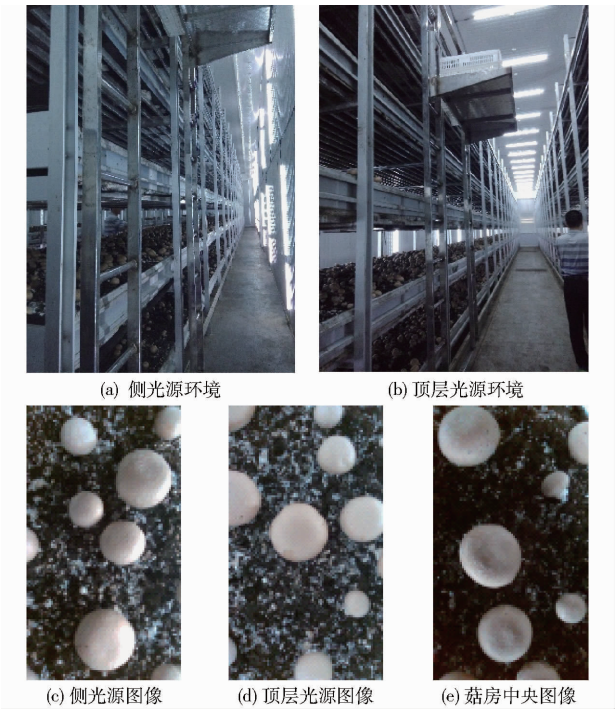


图 1 视频采集现场

Fig. 1 Video capture scenes

每一间菇房里有 2 个蘑菇架,每一个菇架有 6 层,每一层有 18 个菇床,每一个菇床上方空间长 1 340 mm、宽 1 400 mm、高 400 mm,菇床里的营养土含有大量菌丝,土面高出边框至多 50 mm;根据市场需求将褐蘑菇分为香啡、贵啡、牛排、大褐 4 种,对应菌盖直径为 40 ~ 50 mm、60 ~ 70 mm、80 ~ 90 mm、100 mm,对应菌柄高度为 20、30、30、55 mm,主产牛排菇。拟研制的蘑菇采摘机器人沿着菇架自动滑行、停靠、升降于菇床旁边,机械臂伸入菇床自动完成采摘任务。采摘过程中,机械臂呈 S 型遍历菇床,安装在机械臂末端的 3D 相机沿途采集菇床深度视频流并实时送入工控机,由工控机计算每个蘑菇在世界坐标系下的位置以及直径和倾斜度,供机械手选择性采摘直径为 80 ~ 90 mm 的牛排菇。

依据菇床上方空间 400 mm 的高度限制,本实验选用尺寸为 110 mm × 12.6 mm × 4.1 mm 的消费级 Intel RealSense Camera SR300 型嵌入式结构光 3D 相机,其为 RGB + Depth 型彩色、红外双目相机。相机工作时,红外激光发射器向被测物体表面发射结构光斑,红外摄像头捕获红外光斑的相位偏移后获取深度图像,可避免彩色图像受限于光照条件的影响。其工作参数为:深度量程 200 ~ 1 500 mm,测量误差不超过 1%,在实际应用中可增加到 2%;红外激光发射器波长 860 nm,发射角 72.5° × 60°;红外摄像头视角 71.5° × 55°,视频采集速率 60 f/s。

选用研龙 HS201 - 6C 型工控机,载有 Intel 酷睿 I5 CPU,支持 USB3.0、RS485、RS232 通信接口,安装

64 位 Windows 10 系统、C/C + + 语言编译器 Visual Studio 2015、计算机视觉函数库 OpenCV - 3.1 和相机驱动程序 Intel RealSense SDK，以采集菇床深度视频流。

2　蘑菇图像分割

3D 相机所采集的菇床深度图像为分辨率为 640 像素 ×480 像素的灰度图像，其灰度值代表相机平面至菇床表面点云的距离（单位：mm），因而蘑菇表面呈深灰色，土壤表面呈浅灰色（图 2a）。观察发现，相机的成像特性使得结构光投射到凹凸表面易发生测不到现象，产生了 177 054 个灰度为零的噪声点，因而蘑菇边缘区域、土壤凹凸不平区域以及图像边缘存在部分零噪声点（图 2b），剔除这些噪声点，统计深度图像的直方图（图 2c）可知，菇床表面点云的灰度在 200 ~ 400 之间。

由于土壤表面不一定平整，图像二值化时须确立一个动态阈值来适应相机的移动。计算灰度图像中 130 140 个非零像素灰度的均值为 321，大于该均值的非零像素的灰度众数能够表示土壤表面点云，其众数为 346，蘑菇高度至少 20 mm，考虑 5 mm 的高度裕度，设定动态灰度阈值为 331，对灰度图像进行二值化，确保提取出特定直径的蘑菇区域（图 2d）。相机的成像特性使得二值图中蘑菇边界失去了其本身的光滑轮廓，有必要对二值图进行形态学开运算、高斯滤波等边缘平滑处理（图 2e），使零噪声也落在蘑菇边界轮廓上（图 2f）。

3　粘连蘑菇识别

由于菇床上出茬的蘑菇不同程度地倾斜、粘连，其二值图通常呈现类圆形，这与圆形 Hough 变换检测的标准圆有一定的偏差，为了获取蘑菇的原始边界轮廓，可考虑先借助圆形 Hough 变换初步检测圆心和半径，再结合蘑菇本身的边界轮廓来分割相互粘连的蘑菇，获取单体蘑菇边界轮廓的二维坐标。

传统圆形 Hough 变换的基本思想是将图像的空间域变换到参数空间，用大多数边界点满足的某种参数形式来描述图像中的边缘曲线，通过累加投票求得峰值对应点。具体方法为，将 $X-Y$ 平面上的圆转换到 $X-Y-R$ 参数空间，则图像空间中过任意一点的圆对应于参数空间中的一个三维锥面，图像空间中同一圆上的点对应于参数空间中所有三维锥面相交的一点，通过累积投票可求得这一点的圆参数。传统圆形 Hough 变换对噪声不敏感，能够检测变形或缺失的圆，但由于采用一到多的参数映射，

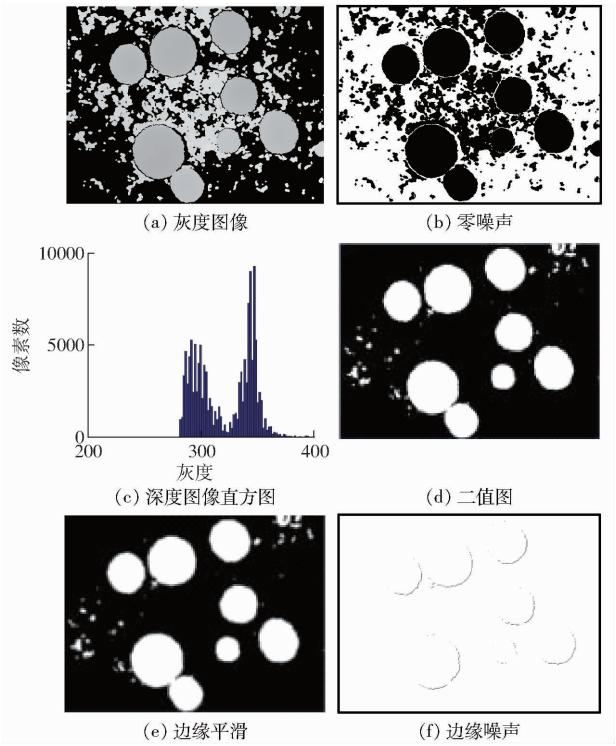


图 2　深度图像背景分割

Fig. 2　Background segmentation of depth image

计算开销大，占用内存空间大，难于确定参数量化间隔标准。针对以上不足，研究者们提出了多种改进算法，较为常用的 2 - 1 圆形 Hough 变换[16]将传统圆形 Hough 变换的三维 Hough 空间降到二维，具体步骤为：

（1）检测圆心：标记二值图中的连通域并通过 Canny 算子检测其边缘点，绘出所有边缘点的法线，经反复试验设定阈值为 30，法线交汇点处的累加法线数量大于该阈值的点即为圆心（x_0，y_0），分别为 1 号（154，142）、2 号（529，309）、3 号（266，109）、4 号（408，62）、5 号（229，354）、6 号（431，217）、7 号（301，436）（图 3a）。

（2）推导半径：计算某一圆心到所有边缘点的距离，并设定最小半径阈值为 25 像素、最大半径阈值为 300 像素、最小圆心距为 45 像素，在所限定的 25 ~ 300 像素范围内对检测圆进行半径排序并依次计数，经反复试验设定计数阈值为 30，投票数大于该阈值的半径 46、50、59、50、64、47、41 为检测出的

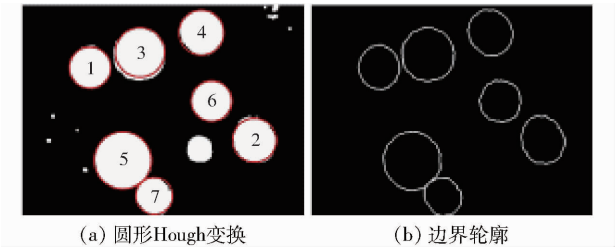


图 3　圆检测

Fig. 3　Cyclo detection

圆半径 r_0。

由图 3a 可知,圆形 Hough 变换检测的圆并不能准确拟合蘑菇的边界点,可考虑以其结果为初始圆心和初始半径,找出二值图(图 2e)中每一个初始圆心所在的连通域,用八邻域跟踪法顺序遍历其边界轮廓(图 3b),分割粘连的蘑菇,获取单体蘑菇边界轮廓的二维坐标。

针对粘连的蘑菇,以 5 号蘑菇为例,顺序提取其圆心周围 1.3 倍半径范围内的边界点直角坐标(图 4a),并转换为极坐标系下的半径 ρ 和角度 θ,将角度 θ 升序排列(图 4b),依次计算相邻两角角度差记为 $\Delta\theta$(图 4c),当 $k=289$ 时,$\Delta\theta=10.9767°$,对应角度序号 j 为 236 和 314(图 4d),试验证明,蘑菇边缘粘连处的 $\Delta\theta$ 通常在 5°~355°之间,据此判断粘连处在红圈与绿圈之间(图 4e),去除红、绿点之间的边界噪声(图 4f),计算初始圆心到红、绿点的半径,在极坐标系下的红、绿点之间插补一系列角间距为 1°的圆弧点(图 4g,表 1),由此获取单体蘑菇边界轮廓的二维坐标。

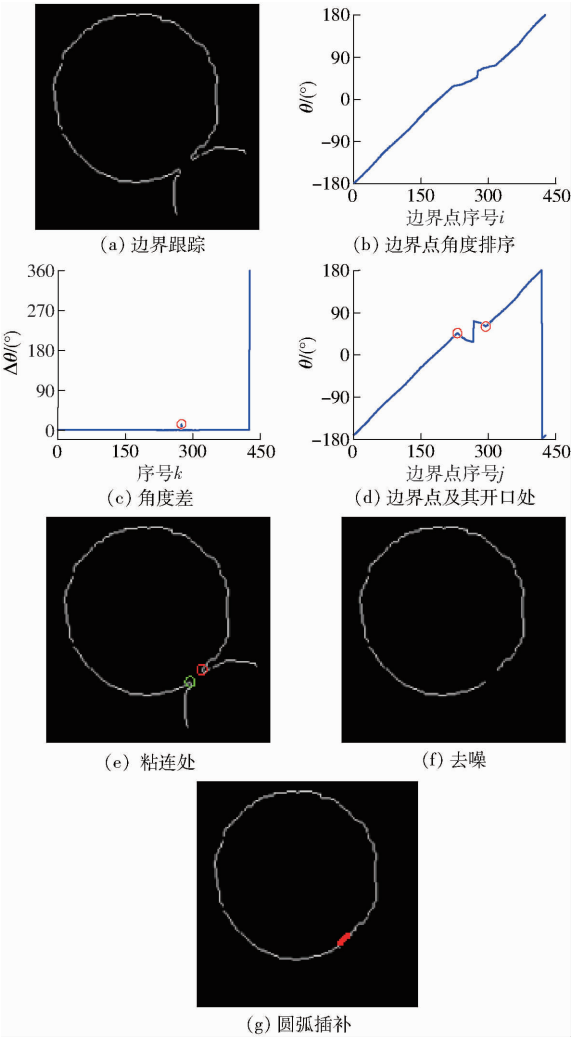


图 4 5 号蘑菇边界拟合

Fig. 4 Boundaries fitting of mushroom 5

表 1 5 号蘑菇插补的圆弧点

Tab. 1 Points interpolation in arc of mushroom 5

极坐标系		直角坐标系	
θ/(°)	ρ/像素	y/像素	x/像素
48.496 2	64.167 0	402.131 2	271.601 2
49.496 2	64.328 5	402.988 8	270.861 0
50.496 2	64.49 0	403.835 1	270.103 7
51.496 2	64.651 4	404.669 8	269.329 5
52.496 2	64.812 9	405.492 7	268.538 7
53.496 2	64.974 3	406.303 3	267.731 4
54.496 2	65.135 8	407.101 4	266.907 8
55.496 2	65.297 3	407.886 5	266.068 1
56.496 2	65.458 7	408.658 5	265.212 4
57.496 2	65.620 2	409.417 0	264.341 1

4 蘑菇原位测量

假设 SR300 相机的世界坐标系 XYZ 是以红外摄像头光心为原点的右手螺旋型,Z 为光心到物体表面的距离,由于图像坐标系 xy 通常以图像左上角为原点且灰度图像的灰度 z 等于 Z,则由深度相机的视场角和图像分辨率可推导出图像中某像素点 (x,y) 对应的世界坐标系坐标 (X,Y,Z)。

为了获取相机世界坐标系下单体蘑菇的圆心位置、直径、偏向角和倾斜角等参数,首先,校准相机的世界坐标系;然后,验证相机世界坐标系下原位测量陶瓷圆板的圆心位置、直径、偏向角和倾斜角的精度。

4.1 相机坐标系校准

相机固定在铝支架上,置于可移动桌面上方,采集并显示桌面的深度视频流,调用视频窗口的回调函数获取鼠标指向位置的深度值,将鼠标依次指向桌面的 4 个角,微调相机的摆放角度,直至 4 个角均显示图像灰度近似 290,表明相机摆放基本平整。

桌面上摆放一张刻度为 10 mm 的方格坐标纸,为了在坐标纸上寻找相机的 X 轴,将一个平整的黑色盒子边缘与网格线重合,采集桌面的深度视频流,并显示其二值图(图 5a),调用视频窗口的回调函数获取鼠标指向位置的 Y 坐标值,将鼠标指向黑盒子的底边,轻微移动桌子,直至黑盒子底边上各点 Y 坐标值近似 207(图 5b),表明相机 X 轴与网格线平行。

为了在坐标纸上寻找相机的坐标原点,将一个圆柱体置于坐标纸中间的某十字线上,采集并显示桌面的深度视频流(图 5c),调用视频窗口的回调函数获取鼠标指向位置的 X、Y 坐标值,将鼠标指向圆柱体的中心,微调圆柱体的位置,直至圆柱体的中心点坐标显示(320,240)(图 5d)。

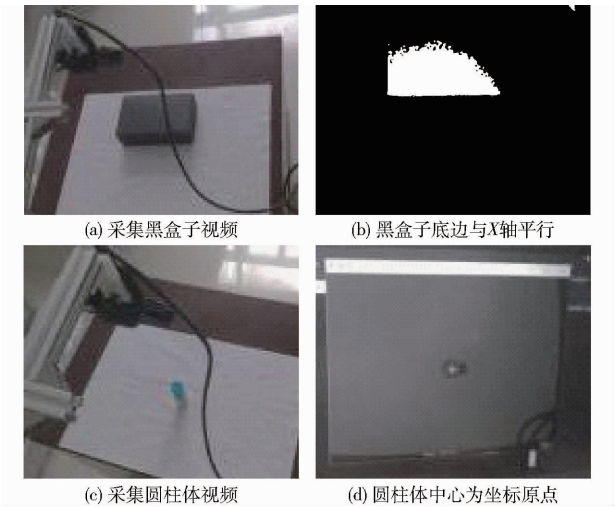

(a) 采集黑盒子视频
(b) 黑盒子底边与X轴平行
(c) 采集圆柱体视频
(d) 圆柱体中心为坐标原点

图 5　相机坐标系校准

Fig. 5　Coordinate system's calibration of camera

4.2　陶瓷圆板原位测量方法

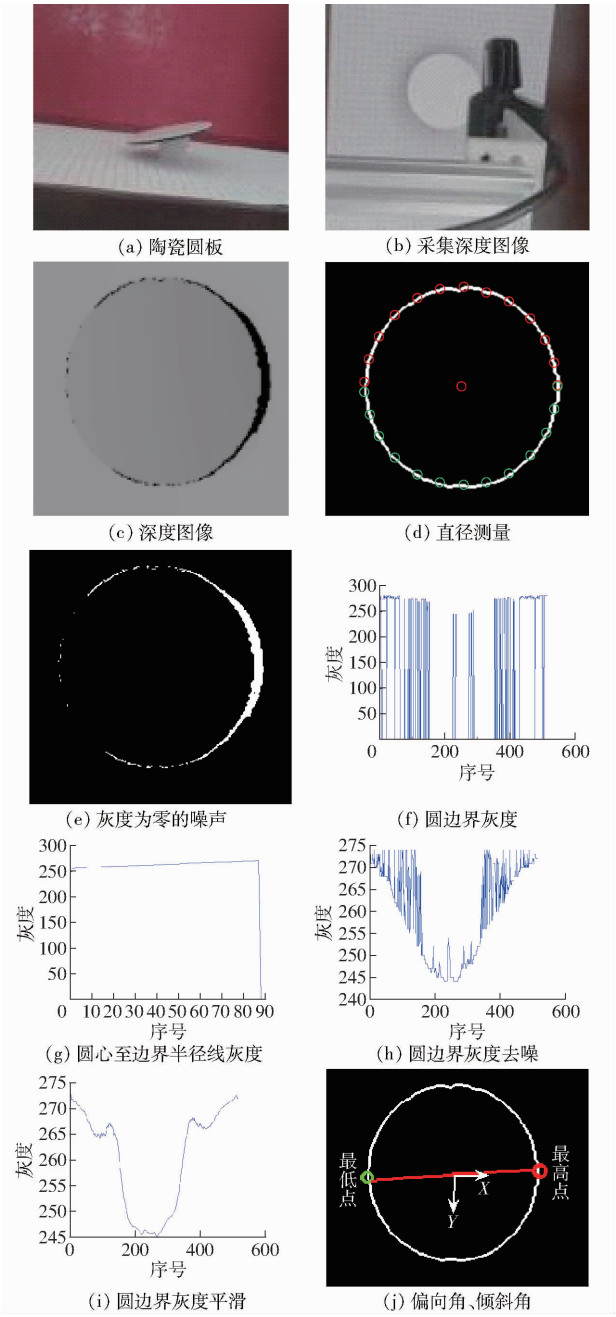
为了模拟褐蘑菇，取一块直径为 100 mm 的标准陶瓷圆板以 X 轴向下倾斜 15°（偏向角为 −90°，倾斜角为 15°）立于世界坐标系原点附近（图 6a），采集桌面的深度图像（图 6b、6c），经上述图像分割算法获取陶瓷圆板的边界点的二维坐标，基于此，验证圆板的圆心位置、直径、偏向角和倾斜角的测量精度，步骤为：

（1）圆心位置：计算陶瓷圆板边界点的二维坐标的均值，获取陶瓷圆板的圆心 (x_0, y_0) 及其灰度 z_0，由相机的视场角和图像分辨率推导出世界坐标系下陶瓷圆板的圆心坐标为（−7.014 9 mm，−0.54 mm，256 mm），基本在世界坐标系原点附近。

（2）直径：取陶瓷圆板边界上两点 (x_1, y_1)、(x_2, y_2) 及其灰度 z_1、z_2，使得两点到圆心的夹角近似 180°，则世界坐标系下两点间的距离为 $\sqrt{(x_1-x_2)^2+(y_1-y_2)^2+(z_1-z_2)^2}$，如此重复 13 次获取的平均直径为 100.87 mm（图 6d），直径测量误差为 0.87 mm。

由于二值化后的边缘平滑处理，陶瓷圆板边界点的灰度存在零噪声（图 6e、6f），可由噪声边界点 (x_1, y_1) 与圆心 (x_0, y_0) 建立两点式直线方程 $(y-y_0)/(y_1-y_0)=(x-x_0)/(x_1-x_0)$，获取圆心至边界半径线上所有点的灰度（图 6g），并沿着半径方向取零噪声点附近的灰度替代零噪声（图 6h），进一步对圆板边界灰度进行滑动平均以便更好地拟合蘑菇边缘深度（图 6i）。

（3）偏向角和倾斜角：求取圆边界上全部 515 个点的灰度标准差为 9.748 8，经试验统计，标准差大于 7 可判断为倾斜。求取 13 条直径端点的最低点（−58.530 5，2.296 9，272.235 3）和最高点（39.350 7，−1.036 3，245.641），计算两点连线在 $X-Y$ 平面上的投影与 Y 轴的偏向角为 −88.094 3°，误差为 1.905 7°，与 $X-Y$ 平面向下的倾斜角为 15.199 6°（图 6j），误差为 0.199 6°。



(a) 陶瓷圆板
(b) 采集深度图像
(c) 深度图像
(d) 直径测量
(e) 灰度为零的噪声
(f) 圆边界灰度
(g) 圆心至边界半径线灰度
(h) 圆边界灰度去噪
(i) 圆边界灰度平滑
(j) 偏向角、倾斜角

图 6　原位测量精度验证

Fig. 6　Verification of measurement accuracy in site

5　现场试验与分析

对蘑菇房现场采集的 185 幅深度图像进行上述蘑菇图像分割、粘连蘑菇识别及蘑菇原位测量算法试验，以验证本文算法的性能和精度。

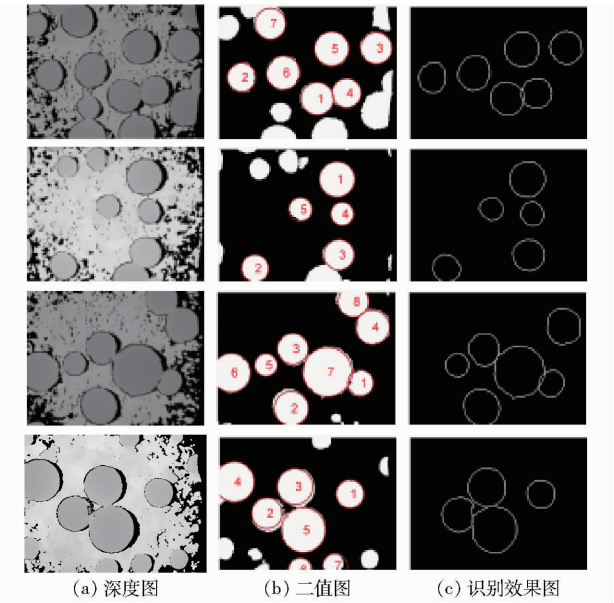
5.1　蘑菇图像分割性能试验

对 185 幅深度图像进行蘑菇图像分割试验，自适应设定动态阈值，对深度图像进行二值化，以较少

的噪声提取蘑菇区域为分割效果的评价标准,结果表明,准确分割 177 幅图像,蘑菇图像分割正确率为 95.68%。部分图像分割不准确的原因是,手持相机采集图像时,难以确保相机平面的水平性。

5.2 粘连蘑菇识别性能试验

统计 185 幅图像中含粘连蘑菇的图像共 146 幅,粘连蘑菇大多两两粘连、少数闭环粘连(图 7),对其进行粘连蘑菇识别试验,结果表明,正确识别粘连蘑菇图像 146 幅,粘连蘑菇识别正确率为 100%。



(a) 深度图 (b) 二值图 (c) 识别效果图

图 7 粘连蘑菇识别结果

Fig. 7 Effect of image recognition of adhesive mushrooms

5.3 蘑菇原位测量性能试验

选取不同光源下不同菇床区域的 14 个蘑菇,用游标卡尺人工测量其直径,目测其倾斜角(表 2),再以这 14 个蘑菇为中心采集菇床深度图像,对其进行基于陶瓷圆板的原位测量算法试验,测量单体蘑菇的圆心位置、直径、偏向角和倾斜角,结果表明,机器测量的直径均在香啡、贵啡、牛排的菌盖直径范围内,直径误差最大为 5.57 mm、倾斜角误差最大为 6.3°(表 2),测量结果符合实际,测量算法实际有效。

由于视频流保存的图像视野范围连续渐变,故选取不同菇床位置的 17 幅深度图像,记录其运行时间,并统计每一幅图像的蘑菇数量(图 8),结果表明,随着图像中蘑菇数量的增加,运行时间也随之增加,每幅图像的平均运行时间为 206 ms;单体蘑菇的平均运行时间为 44 ms,粘连蘑菇的运行时间略长。

表 2 蘑菇原位测量精度试验结果

Tab. 2 Results of measurement accuracy in site of mushroom

人工测量		机器测量		
直径/mm	倾斜角/(°)	直径/mm	偏向角/(°)	倾斜角/(°)
60	0	64.93	0	0
80	0	84.08	0	0
70	0	69.40	0	0
80	15	75.96	-98.84	19.9
70	0	73.31	0	0
80	30	83.16	-51.10	23.7
80	0	78.22	0	0
60	0	61.04	0	0
80	0	79.18	0	0
70	0	73.13	0	0
40	0	45.57	0	0
80	30	81.98	-103.70	28.0
60	0	59.29	0	0
80	30	80.38	8.71	28.5

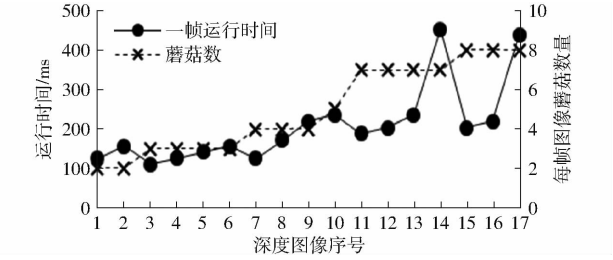


图 8 每幅图像运行时间

Fig. 8 Run speed of each image

6 结论

(1)针对褐蘑菇的菌丝大,干扰背景,在深度图像中利用蘑菇菌柄高度至少 20 mm,结合土壤表面深度的众数,自适应选择动态阈值,从菇床背景中快速、准确地提取了蘑菇菌盖二值图。

(2)针对菇床上倾斜、粘连的类圆形蘑菇,基于 2-1 圆形 Hough 变换初步检测了圆心、半径,以此为种子对蘑菇的边界轮廓进行跟踪、去噪、插补,分割粘连的蘑菇,准确拟合蘑菇的边界点,获取了单体蘑菇边界点的二维坐标。

(3)校准了相机坐标系,针对标准陶瓷圆板深度图像,利用原位测量方法得出圆板直径误差为 0.87 mm,倾斜角误差为 0.199 6°。

(4)现场试验表明,深度图像对光源不敏感,图像分割效果良好,蘑菇直径的误差最大为 5.57 mm,倾斜角的最大误差为 6.3°;视频帧的平均运行时间为 206 ms,单体蘑菇的平均运行时间为 44 ms。

参 考 文 献

1 李娜. 褐蘑菇采收与盐渍加工技术[J]. 中国食用菌, 2009, 28(2): 49-50.

LI Na. Study on harvesting and salting process of portobello mushroom[J]. Edible Fungi of China, 2009, 28(2): 49 – 50. (in Chinese)

2 陈红，夏青，左婷，等. 基于机器视觉的花菇分选技术[J/OL]. 农业机械学报，2014，45(1):281 – 287. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no = 20140143&flag = 1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.01.043.
CHEN Hong, XIA Qing, ZUO Ting, et al. Determination of shiitake mushroom grading based on machine vision[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(1):281 – 287. (in Chinese)

3 陈红，夏青，左婷，等. 基于纹理分析的香菇品质分选方法[J]. 农业工程学报,2014,30(3):285 – 292.
CHEN Hong, XIA Qing, ZUO Ting, et al. Quality grading method of shiitake based on texture analysis[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(3): 285 – 292. (in Chinese)

4 陈红，夏青，左婷，等. 破损花菇机器视觉检测技术[J/OL]. 农业机械学报，2014，45(11):60 – 67. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20141110&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.11.010.
CHEN Hong, XIA Qing, ZHUO Ting, et al. Application of machine vision in detection of broken shiitake[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(11):60 – 67. (in Chinese)

5 周云山，李强，李红英，等. 计算机视觉在蘑菇采摘机器人上的应用[J]. 农业工程学报，1995，11(4):27 – 32.
ZHOU Yunshan, LI Qiang, LI Hongying, et al. Application of computer vision in mushroom picking robot [J]. Transactions of the CSAE, 1995, 11(4):27 – 32. (in Chinese)

6 俞高红，赵匀，李革，等. 基于机器视觉的蘑菇单体检测定位算法及其边界描述[J]. 农业工程学报，2005，21(6):101 – 104.
YU Gaohong, ZHAO Yun, LI Ge, et al. Algorithm for locating individual mushroom an description of its contour using machine vision [J]. Transactions of the CSAE, 2005, 21(6):101 – 104. (in Chinese)

7 ZHAO Y S, GONG L, HUANG Y X, et al. A review of key techniques of vision-based control for harvesting robot[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2016.127:311 – 323.

8 郑立华，麦春艳，廖崴，等. 基于 Kinect 相机的苹果树三维点云配准[J/OL]. 农业机械学报,2016,47(5):9 – 14. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20160502&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.05.002.
ZHENG Lihua, MAI Chunyan, LIAO Wei, et al. 3D point cloud registration for apple tree based on Kinect camera[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(5): 9 – 14. (in Chinese)

9 刘刚，张雪，宗泽，等. 基于深度信息的草莓三维重建技术[J/OL]. 农业机械学报，2017，48(4): 160 – 165,172. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20170421&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.04.021.
LIU Gang, ZHANG Xue, ZONG Ze, et al. 3D reconstruction of strawberry based on depth information[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(4): 160 – 165,172. (in Chinese)

10 何东健，邵小宁，王丹，等. Kinect 获取植物三维点云数据的去噪方法[J/OL]. 农业机械学报,2016,47(1):331 – 336. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20160145&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.01.045.
HE Dongjian, SHAO Xiaoning, WANG Dan, et al. Denoising method of 3-D point cloud data of plants obtained by Kinect[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016,47(1):331 – 336. (in Chinese)

11 沈跃，徐慧，刘慧，等. 基于 K-means 和近邻回归算法的 Kinect 植株深度图像修复[J]. 农业工程学报,2016,32(19):188 – 194.
SHEN Yue, XU Hui, LIU Hui, et al. Kinect scanning plant depth image restoration based on K-means and K-nearest neighbor algorithms[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(19): 188 – 194. (in Chinese)

12 冯青春，陈建，李翠玲，等. 基于光度立体视觉的蔬菜秧苗叶片形态测量方法[J/OL]. 农业机械学报，2018,49(5):43 – 50. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20180505&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.05.005.
FENG Qingchun, CHEN Jian, LI Cuiling, et al. Measurement method of vegetable seedling leaf morphology based on photometric stereo[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2018,49(5):43 – 50. (in Chinese)

13 朱冰琳，刘扶桑，朱晋宇，等. 基于机器视觉的大田植株生长动态三维定量化研究[J/OL]. 农业机械学报,2018,49(5): 256 – 262. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20180530&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.05.030.
ZHU Binglin, LIU Fusang, ZHU Jinyu, et al. Three-dimensional quantifications of plant growth dynamics in field-grown plants based on machine vision method[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2018,49(5):256 – 262. (in Chinese)

14 李长勇，曹其新. 基于深度图像的蔬果形状特征提取[J/OL]. 农业机械学报,2012,43(增刊):242 – 245. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 2012s50&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.S0.050.
LI Changyong, CAO Qixin. Extraction method of shape feature for vegetables based on depth image[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2012,43(Supp.):242 – 245. (in Chinese)

(下转第 108 页)

12 ALI R, MAHAPATRA D R, GOPALAKRISHNAN S. An analytical model of constrained piezoelectric thin film sensors[J]. Sensors & Actuators a Physical, 2004, 116(3): 424 – 437.

13 ALI R, MAHAPATRA D R, GOPALAKRISHNAN S. Constrained piezoelectric thin film for sensing of subsurface cracks[J]. Smart Materials & Structures, 2005, 14(2): 376 – 386.

14 周利明,张小超,刘阳春,等. 联合收获机谷物损失测量 PVDF 阵列传感器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2010, 41(6): 167 – 171.
ZHOU Liming, ZHANG Xiaochao, LIU Yangchun, et al. Design of PVDF sensor array for grain loss measuring[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(6): 167 – 171. (in Chinese)

15 JB/T 5672—1991 谷物联合收割机损失监视仪[S]. 1991.

16 白鹏,张喜斌,张斌,等. 支持向量机理论及工程应用实例[M]. 西安:西安电子科技大学出版社, 2008.

17 刘志刚,李德仁,秦前清,等. 支持向量机在多类分类问题中的推广[J]. 计算机工程与应用, 2004, 40(7): 10 – 13.
LIU Zhigang, LI Deren, QIN Qianqing, et al. An analytical overview of methods for multi-category support vector machines[J]. Computer Engineering & Applications, 2004, 40(7): 10 – 13. (in Chinese)

18 马玥,姜琦刚,孟治国,等. 基于随机森林算法的农耕区土地利用分类研究[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(1): 297 – 303. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no = 20160140&flag = 1. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2016.01.040.
MA Yue, JIANG Qigang, MENG Zhiguo, et al. Classification of land use in farming area based on random forest algorithm[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(1): 297 – 303. (in Chinese)

19 周植宇,杨明,薛林继,等. 一种基于高斯核支持向量机的非结构化道路环境植被检测方法[J]. 机器人, 2015, 37(6): 702 – 707.
ZHOU Zhiyu, YANG Ming, XUE Linji, et al. Vegetation detection approach based on Gaussian kernel support vector machine in unstructured road environment[J]. Robot, 2015, 37(6): 702 – 707. (in Chinese)

20 何强. 支持向量机在嵌入式图像识别中的研究[D]. 杭州:杭州电子科技大学, 2015.

21 梁振伟,李耀明,赵湛,等. 纵轴流联合收获机籽粒清选损失监测数学模型研究[J/OL]. 农业机械学报, 2015, 46(1): 106 – 111. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no = 20150116&flag = 1. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2015.01.016.
LIANG Zhenwei, LI Yaoming, ZHAO Zhan, et al. Monitoring mathematical model of grain cleaning losses on longitudinal-axial flow combine harvester[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(1): 106 – 111. (in Chinese)

22 中国科学院沈阳自动化研究所. 一种谷物流量检测实验平台:106813755[P]. 2017 – 06 – 09.

23 WANG He, HU Jingtao, GAO Lei, et al. Development and optimization of a novel grain flow sensor based on PVDF piezoelectric film[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2016, 9(4): 141 – 150.

24 NY/T 1355—2007 玉米收获机作业质量[S]. 2007.

(上接第 19 页)

15 麦春艳, 郑立华, 孙红, 等. 基于 RGB – D 相机的果树三维重构与果实识别定位[J/OL]. 农业机械学报, 2015, 46(增刊): 35 – 40. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 2015S006&journal_id = jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2015.S0.006.
MAI Chunyan, ZHENG Lihua, SUN Hong, et al. Research on 3D reconstruction of fruit tree and fruit recognition and location method based on RGB – D camera[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(Supp.): 35 – 40. (in Chinese)

16 JIANG Y, LI C Y, PATERSON A H. High throughput phenotyping of cotton plant height using depth images under field conditions[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2016, 130: 57 – 68.

17 宗泽, 郭彩玲, 张雪, 等. 基于深度相机的玉米株型参数提取方法研究[J/OL]. 农业机械学报, 2015, 46(增刊): 50 – 56. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 2015S009&journal_id = jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2015.S0.009.
ZONG Ze, GUO Cailing, ZHANG Xue, et al. Maize plant type parameters extraction based on depth camera[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(Supp.): 50 – 56. (in Chinese)

18 DIONISIO A, ANGELA R, CESAR F Q, 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.

19 EHUD B, ROTEM M, OHAD B S. Colour-agnostic shape-based 3D fruit detection for crop harvesting robots[J]. Biosystems Engineering, 2016, 146: 57 – 70.

20 叶峰, 陈灿杰, 赖乙宗, 等. 基于有序 Hough 变换的快速圆检测算法[J]. 光学精密工程, 2014, 22(4): 1104 – 1111.
YE Feng, CHEN Canjie, LAI Yizong, et al. Fast circle detection algorithm using sequenced Hough transform[J]. Optics and Precision Engineering, 2014, 22(4): 1104 – 1111. (in Chinese)