

## 基于线结构光视觉的番茄重叠果实识别定位方法研究

冯青春<sup>1</sup> 程伟<sup>1,2</sup> 杨庆华<sup>2</sup> 荀一<sup>2</sup> 王秀<sup>1\*</sup>

(1. 北京农业智能装备技术研究中心/国家农业智能装备工程研究中心/农业部农业信息  
技术重点实验室/农业智能装备技术北京市重点实验室,北京 100097;

2. 浙江工业大学 机械工程学院/特种装备制造与先进加工技术教育部重点实验室,杭州 310032)

**摘要** 为实现番茄自动化采收,针对温室光照条件多变、背景复杂及果实簇生遮挡的特征,构建了基于线结构光视觉的番茄果实识别定位视觉系统,并提出了一种针对簇生重叠果实的区域分割方法。在(2R-G-B)色差模型下利用动态阈值分割,提取成熟果实区域;计算亮度渐变梯度向量,采用灰度重心法提取结构光条纹中心线;基于线结构光立体测量原理,在光条纹扫描视场过程中实时获取成熟果实表面三维信息,并映射形成果实表面与相机光心距离深度图像,实现簇生重叠果实区域的立体分割;基于果实表面激光条纹点空间坐标拟合果实外接球体,获取果实形态和空间坐标信息;试验结果表明,视觉系统单次识别测量耗时2.8 s,果实直径测量误差小于6 mm,果实与摄像机中心距测量误差小于8 mm。

**关键词** 番茄采摘机器人;线结构光;立体视觉;果实遮挡

中图分类号 TP 242.6

文章编号 1007-4333(2015)04-0100-07

文献标志码 A

## Identification and localization of overlapping tomatoes based on linear structured light vision system

FENG Qing-chun<sup>1</sup>, CHENG Wei<sup>1,2</sup>, YANG Qing-hua<sup>2</sup>, XUN Yi<sup>2</sup>, WANG Xiu<sup>1\*</sup>

(1. Beijing Research Center of Intelligent Equipment for Agriculture/National Research Center of Intelligent Equipment for Agriculture/Key Laboratory of Agri-informatics, Ministry of Agriculture/Beijing Key Laboratory of Intelligent Equipment Technology for Agriculture, Beijing 100097, China;

2. Key Laboratory of Special Purpose Equipment and Advanced Processing Technology of Ministry of Education, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310000, China)

**Abstract** According to the variable illumination conditions, complex background and overlapping targets of tomato, a new method of identification and localization was proposed based on linear structured light vision system. The ripe fruit area was firstly extracted under the dynamic threshold segmentation in (2R-G-B) model. The blue line laser stripe area was then determined in B channel. The direction for image of light stripe was combined with gray barycenter method for extracting the center of laser stripe area. The ripe fruit area was then filled with gray which mapped the depth information of the fruits based on the spatial localization property of the linear structured light and the difference of depth between overlapping tomatoes. The segmentation and the spatial information of the overlapping tomato were finally obtained. The field test showed that the measurement error on the fruit radius and the centre distance error between the fruit and camera were less than 6 mm and 8 mm respectively.

**Key words** tomato harvesting robot; linear structured light; stereo vision; target occlusion

目前我国鲜食番茄种植面积约66.7万hm<sup>2</sup>,依靠人工采摘劳动强度大、效率低,并且随着农业劳动力流失,番茄采摘成本逐年上升,开发番茄自动采收

设备可以有效改善目前生产现状<sup>[1]</sup>。番茄生长于温室内,由于光照多变、背景复杂以及果实簇生重叠,能否准确获取果实采摘信息,已成为制约番茄采摘

收稿日期:2014-11-10

基金项目:国家“863”计划资助项目(2012AA101903);果类蔬菜产业体系北京市创新团队项目

第一作者:冯青春,助理研究员,主要从事农业机器人方面研究,E-mail:fengqc@nercita.org.cn

通讯作者:王秀,研究员,主要从事作物肥水精准施用装备方面研究,E-mail:wangx@nercita.org.cn

机器人进一步发展的瓶颈技术之一<sup>[2-6]</sup>。采摘机器人的果实识别定位单元,自20世纪90年代以来不断被国内外科研人员创新设计,目前就其所采用的技术手段主要分为两类:被动探测和主动探测。被动探测以双目视觉技术为代表,在黄瓜<sup>[7-9]</sup>、苹果<sup>[10-11]</sup>以及草莓<sup>[12-13]</sup>等单一、非簇生果实自动采摘系统被广泛应用;主动探测需集成激光、光栅以及高光谱等主动投射元件<sup>[14-25]</sup>,结构相对复杂,主要针对目标重叠遮挡、簇生果实以及目标背景颜色相近等实际工况。随着智能化采摘技术不断发展应用,融合主动探测手段获取果实采摘信息,已成为采摘机器人环境信息感知的重要技术手段。本研究采用一种基于结构光视觉技术的主动视觉探测方法和系统,通过解决负责背景下成熟果实区域分割和果实表面散射光条纹中心线提取的技术难点,以期基于结构光视距立体测量原理,获取簇生果实表面的立体信息,并根据空间测量结果对重叠果实进行分割。

## 1 试验系统介绍

### 1.1 作业工况

如图1所示,采摘机器人系统作业过程中,以轨道为支撑在番茄行中间直线行走,对其两侧成熟番茄进行识别和采摘。番茄行与轨道中心相距600 mm,其茎秆由吊线悬挂于温室顶部,通过释放吊线降低植株高度,以确保待采果实分布于轨道上方100~600 mm区域。此外该区域叶片由人工去除,以保证待采果实对养分的充分吸收,从而避免叶片对果实遮挡情况,有利于自动采收作业实施。

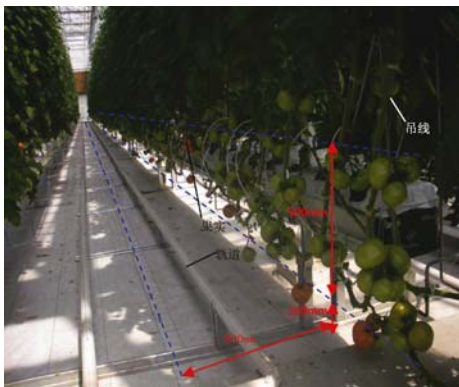


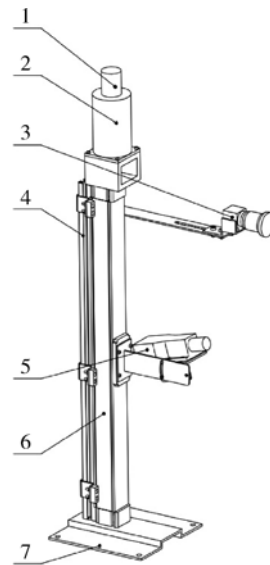
图1 采摘机器人作业工况

Fig. 1 Work condition

### 1.2 线结构光视觉系统

如图2所示番茄采摘机器人果实识别定位系

统,其由彩色摄像机、线激光器和扫描驱动单元等部件构成,其中扫描驱动单元包括电机、编码器以及直线导轨。摄像机固定于支撑杆采集图像至系统控制器。当摄像机视场内存在成熟果实存在,则开启线光发生器,并由上至下扫描摄像机视场。基于结构光三维测量原理,根据光条纹照射成熟果实区域时光条纹的像素点坐标和扫描偏移位移获取成熟番茄果实表面三维坐标信息。



1. 编码器;2. 电机;3. 彩色摄像机;4. 支撑杆;  
5. 线结构光发生器;6. 直线导轨;7. 基座。

1. Motor coder 2. Motor;3. Camera 4. Support pole;  
5. Linear structured-light;6. Slider unit;7. Base.

图2 番茄采摘机器人线结构光视觉系统

Fig. 2 Model of structured-light vision

system of tomato harvesting robot

### 1.3 视觉系统三维测量原理

线结构光发生器投射的光平面与摄像机视场内物体表面相交时在物体表面呈现为光条纹,该条纹由于物体表面的深度变化而受到调制,表现在摄像机图像中则是光条发生了畸变和不连续,畸变的程度与深度变化成正比,不连续则表明物体表面间存在空间间隙。当摄像机与发生器光平面相对位置确定后,根据摄像机视场内物体表面光条纹的像素坐标,可以获得物体表面与摄像机的空间位置关系。

以摄像机光心为原点建立世界坐标系,设番茄果实上受结构光照射的一点坐标为 $(X_i, Y_i, Z_i)$ ,若该点对应图像坐标 $(\mu_i, \nu_i)$ ,根据线结构光视觉空间定位原理,如式(1)所示关系成立,

$$\begin{cases} \rho \begin{bmatrix} \mu_i \\ \nu_i \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_x & 0 & \mu_0 & 0 \\ 0 & \alpha_y & \nu_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_i \\ Y_i \\ Z_i \\ 1 \end{bmatrix} \\ aX_i + b(Y_i - D_i) + cZ_i + d = 0 \end{cases} \quad (1)$$

其中:  $a, b, c, d$  为结构光平面方程参数,  $\alpha_x, \alpha_y, \mu_0, \nu_0$  为摄像机自身内部参数, 以上参数均可通过结构光模型标定获得<sup>[14-15]</sup>。

## 2 目标特征提取

### 2.1 成熟果实区域提取

如图 3(a)所示摄像机采集的原始图像, 为了克服太阳光照变化和遮挡阴影的影响, 凸显成熟果实色彩特征与背景差异, 采用  $(2R-G-B)$  色彩模型获取

色差灰度图(图 3(b)), 如式(2)所示, 其中 grey 为色差灰度,  $R, G, B$  分别红、绿、蓝通道灰度值。

$$\text{grey} = \begin{cases} 0 & (2R - G - B) \leq 0 \\ 2R - G - B & \\ 255 & (2R - G - B) \geq 0 \end{cases} \quad (2)$$

采用最大类间方差法<sup>[14]</sup>获取动态阈值对色差灰度图像进行分割后, 统计各候选目标区域  $i$  的像素面积  $S_i$  和圆弧度<sup>[15]</sup>  $R_i$ , 若满足式(3), 则认为是成熟番茄果实区域(摄像机镜头焦距 5 mm, 分辨率  $1\,328 \times 1\,048$  像素, 物距 600~800 mm), 提取结果如图 3(c)所示。

$$\begin{cases} S_i \geq 7\,000 \\ R_i \geq 0.68 \end{cases} \quad (3)$$

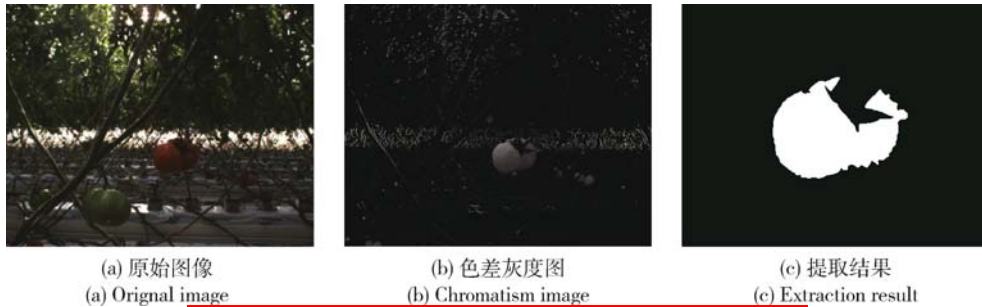


图 3 成熟果实区域提取

Fig. 3 Extraction of mature fruit area

### 2.2 结构光条纹提取

光条纹图像特征受温室内强太阳光、自身散射以及投射物吸收等因素影响, 其中心的精确快速提取直接影响测量精度与效率。本系统选用 470 nm 蓝色线激光发生器, 其开启后以 1 cm 步长扫描视场。扫描过程中基于上述 2.1 成熟番茄区域提取结果去除其他背景后(如图 4(a))所示, 对成熟果实区域进行实时判别, 获取激光条纹在该区域成像特征。

受光源能量散射影响光条纹在图像中的亮度呈梯度变化, 且被番茄球形表面调制后其像素区域为不规则曲线分布。相对单纯依靠色彩特征进行区域分割, 基于亮度梯度变化向量获取光条纹中心线具有更高测量精度<sup>[26]</sup>。光条纹中心线提取步骤如下,

1) 保留蓝色分量灰度值  $B > 150$  像素区域得到光条纹区域图像, 如图 4(b)所示。

2) 如图 4(c)所示, 基于 Soble 算子获取光条纹

像素点  $(\mu, \nu)$  灰度梯度向量  $[G_x, G_y]^T$ , 其极坐标系表示为:

$$\begin{bmatrix} G_\rho \\ G_\varphi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{G_x^2 + G_y^2} \\ \tan^{-1} G_y / G_x \end{bmatrix}$$

式中:  $G_x, G_y$  分别为水平和垂直方向梯度分量值,  $G_\rho$  为梯度值,  $-\frac{1}{2}\pi \leq G_\varphi \leq \frac{1}{2}\pi$  为梯度方向。

3) 为了突出光条纹边缘较大梯度特征, 同时避免条纹中心两侧反向梯度叠加抵消问题<sup>[27]</sup>, 将上述梯度向量表示为二次梯度向量,

$$\begin{bmatrix} G_{xx} \\ G_{yy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_\rho^2 \cos 2G_\varphi \\ G_\rho^2 \sin 2G_\varphi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_x^2 - G_y^2 \\ 2G_x G_y \end{bmatrix}$$

建立左右宽 6 像素, 以光条纹像素分布垂直范围  $(\nu_{\min}, \nu_{\max})$  为高的连续子区域, 如式(4)计算光条纹灰度变化平均二次梯度  $[\overline{G_{xx}}, \overline{G_{yy}}]^T$ ,

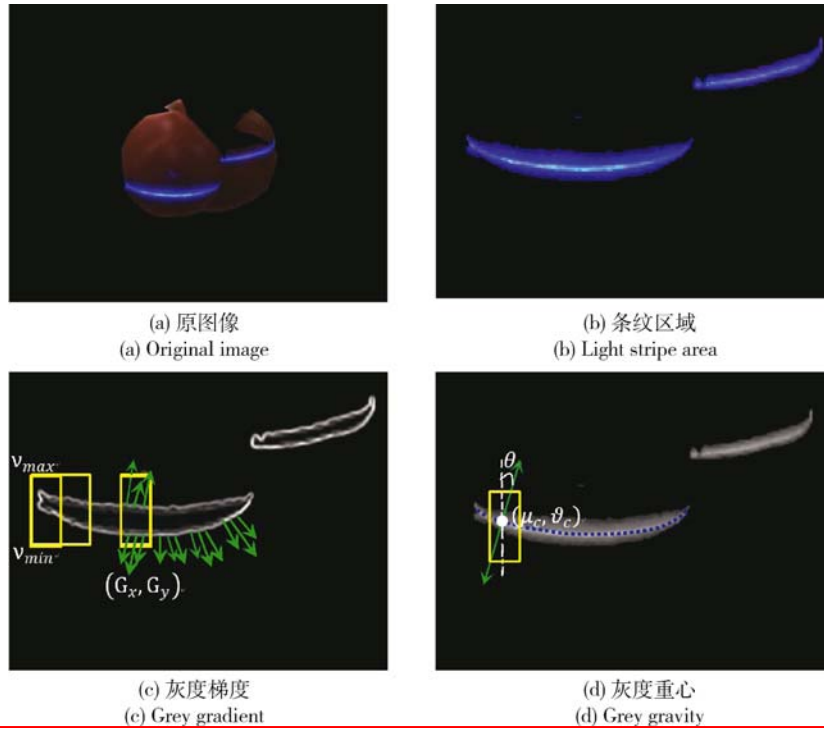


图 4 光条纹中心提取

Fig. 4 Extraction of light stripe center

$$\begin{bmatrix} G_{xx} \\ G_{yy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{\mu=\mu-3}^{\mu+3} \sum_{\nu=\nu_{min}}^{\nu_{max}} (G_x^2 - G_y^2) \\ \sum_{\mu=\mu-3}^{\mu+3} \sum_{\nu=\nu_{min}}^{\nu_{max}} 2G_x G_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{xx} - G_{yy} \\ 2G_{xy} \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中： $G_{xx} = \sum_{\mu=\mu-3}^{\mu+3} \sum_{\nu=\nu_{min}}^{\nu_{max}} G_x^2, G_{yy} = \sum_{\mu=\mu-3}^{\mu+3} \sum_{\nu=\nu_{min}}^{\nu_{max}} G_y^2,$

$$G_{xy} = \sum_{\mu=\mu-3}^{\mu+3} \sum_{\nu=\nu_{min}}^{\nu_{max}} G_x G_y.$$

进一步由式(5)得到子区域内条纹亮度平均梯度方向  $\theta$ ,

$$\theta = \frac{1}{2} \angle (G_{xx} - G_{yy}, 2G_{xy}) =$$

$$\begin{cases} \tan^{-1}(2G_{xy}/(G_{xx} - G_{yy})) - \frac{\pi}{2} & 2G_{xy}(G_{xx} - G_{yy}) \geq 0 \\ \tan^{-1}(2G_{xy}/(G_{xx} - G_{yy})) + \frac{\pi}{2} & 2G_{xy}(G_{xx} - G_{yy}) \leq 0 \end{cases} \quad (5)$$

4)如图 4(d)所示,沿各子区域平均条纹亮度梯度方向,采用灰度重心法计算区域内光条纹中心点坐标为:

$$\begin{bmatrix} \mu_i \\ \nu_i \end{bmatrix} =$$

$$\begin{bmatrix} \mu_i \\ \frac{\sum_{\nu=\nu_{min}}^{\nu_{max}} (\nu_i + \nu \sin \theta_i) * \text{grey}(\mu_i + \nu \cos \theta_i, \nu_i + \nu \sin \theta_i)}{\sum_{\nu=\nu_{min}}^{\nu_{max}} \text{grey}(\mu_i + \nu \cos \theta_i, \nu_i + \nu \sin \theta_i)} \end{bmatrix}$$

式中: $\text{grey}(\mu_i, \nu_i)$ 为区域内像素点 $(\mu_i, \nu_i)$ 灰度值。

### 3 立体测量

#### 3.1 重叠目标的分割

$$\begin{cases} \text{grey}_i = 0 & D_i = \min(D_i) \\ \text{grey}_i = 255 & D_i = \max(D_i) \\ \text{grey}_i = \frac{255(D_i - \min(D_i))}{\max(D_i) - \min(D_i)} \end{cases} \quad (6)$$

番茄果实普遍成簇生长,重叠果实区域的分割是目标识别定位的难点。当同一成熟果实图像区域内存在不连续光条纹线段,则可以初步判断该区域为多果重叠区域。从每段光条纹线段中心线选取 10 个像素点由式(1)计算各点空间坐标 $(X_i, Y_i, Z_i)$ 以及其相对摄像机中心空间距离  $D_i$ ,并按式(6)将光条纹段像素映射为空间距离关联灰度  $\text{grey}_i$ ,结果如图 5 所示。进一步对结构光定步长扫描相邻 2 条

中心线之间的区域进行灰度渐变填充,形成重叠果实区域深度图像,如图6所示,然后利用动态阈值对重叠果实进行分割。



图5 光条纹深度信息灰度映射  
Fig. 5 Stripe gray-level mapping

### 3.2 果实表面空间信息获取

基于上述线结构光空间测量方法得到番茄果实表面光条纹像素对应点的空间坐标,需要进一步计



图6 重叠果实深度图  
Fig. 6 Range image of fruits occluded

算成熟果实中心空间坐标和果实外形尺寸,从而为智能采摘系统执行部件提供操作依据。如图6所示,根据结构光在果体表面扫描过程中光条纹*i*端点和中心空间坐标 $(X_{li}, Y_{li}, Z_{li})$ ,  $(X_{ri}, Y_{ri}, Z_{ri})$ ,  $(X_c, Y_c, Z_c)$ ,拟合果实空间外接球体,作为番茄果实空间轮廓,其半径为*R*,中心坐标 $(X_c, Y_c, Z_c)$ 。

$$R = \max \left\{ \frac{d_{li}^2}{\sqrt{4d_{li}^2 - d_{lri}^2}} \right\}$$

$$d_{li} = \sqrt{(X_{li} - X_c)^2 + (Y_{li} - Y_c)^2 + (Z_{li} - Z_c)^2}$$

$$\begin{cases} X_c = \frac{(Z_{ri} - Z_{li})(X_{li}^2 + Z_{li}^2) + (Z_{li} - Z_{ri})(X_{ri}^2 + Z_{ri}^2) + (Z_{li} - Z_{ri})(X_{li}^2 + Z_{li}^2)}{2X_{li}(Z_{ri} - Z_{li}) + 2X_{ri}(Z_{li} - Z_{ri}) + 2X_{ri}(Z_{li} - Z_{ri})} \\ Y_c = (Y_{li} + Y_{ri})/3 \\ Z_c = \frac{(X_{ri} - X_{li})(X_{li}^2 + Z_{li}^2) + (X_{li} - X_{ri})(X_{ri}^2 + Z_{ri}^2) + (X_{li} - X_{ri})(X_{li}^2 + Z_{li}^2)}{2X_{li}(Z_{ri} - Z_{li}) + 2X_{ri}(Z_{li} - Z_{ri}) + 2X_{ri}(Z_{li} - Z_{ri})} \end{cases}$$

## 4 试验及结果分析

为了验证番茄采摘机器人果实识别定位系统精度,2014年3月17日15:00—18:30(环境光照30~60万lx)在北京小汤山特菜大观园温室,对20个成熟待采番茄果实进行了识别和空间测量试验,试验样本示例如图7所示。将果实区域二维和空间信息参数的测量数据记录如表1所示,其中1~5号为独立生长果实,6~17号为2个果实相互重叠,18~20号为2个以上簇生果实,试验过程中只对重叠果实中最靠近摄像机的单个果实进行分割和测量。

试验结果表明,单次目标识别定位平均耗时2.8 s,其中光条纹视场扫描速度为0.3 m/s。基于对颜色、像素面积和圆形度的判别依据,20个成熟番茄都被准确地从背景分割出来。但是由于番茄果实为非球形、不规则形状,通过3.2所述方法按照球

形测算果径存在误差,当果体较大或者由于重叠果实较多投射到目标果实的光条纹较短时,该误差会相应增加,使得果实直径测量最大误差为6 mm;果实与摄像机空间距离测量误差最大8 mm,该误差主要由于结构光发生器扫描过程中相对摄像机的投射角度不断变化,光条纹在果实球形表面漫反射后,图像特征不稳定,亮度粗细不均,造成其中心线提取不准确的问题引起,进一步通过选配更加精细和明亮的结构光发生器可以适度降低。

## 5 结论

采用线结构光视觉主动探测手段,可以有效克服温室复杂光照和目标遮挡问题对番茄采摘机器人环境适应能力的限制。基于(2R-G-B)色差模型的目标区域分割方法,可以充分凸显不同太阳光照条件下成熟果实与背景的色彩特征差异;根据结构光条纹亮度梯度向量,采用灰度重心法提取条纹中心

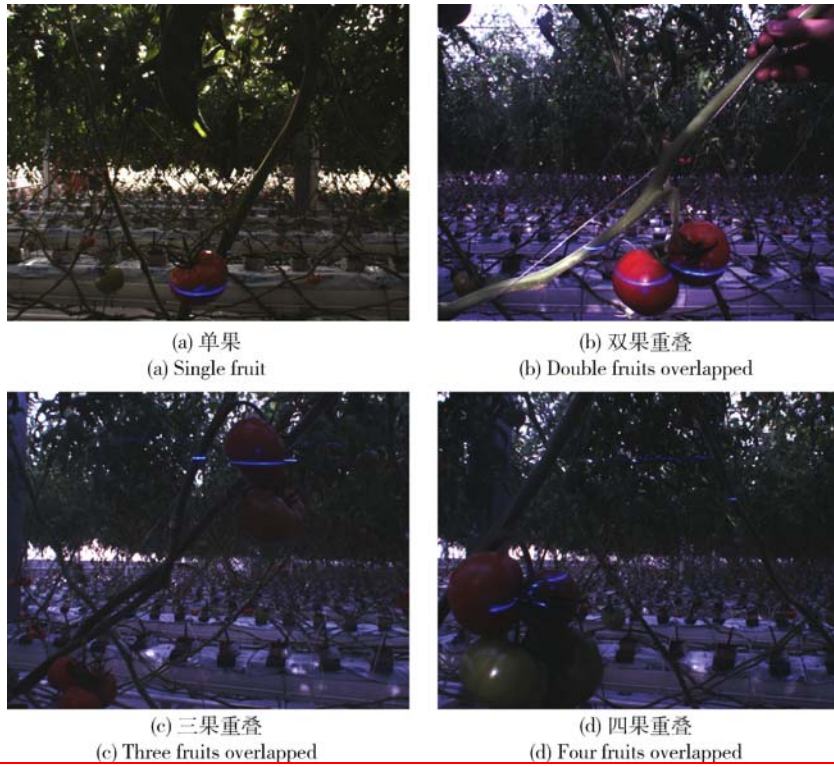


图 7 试验样本示例

Fig. 7 Test samples

表 1 果实识别定位系统测试试验结果

Table 1 Test result

序号 No.	像素面积/ 圆形度 Size/ Circularity	果直径/mm Radius		中心距/mm Distance		序号 No.	像素面积/ 圆形度 Size/ Circularity	果直径/mm Radius		距离/mm Distance	
		自动 Auto	人工 Man	自动 Auto	人工 Man			自动 Auto	人工 Man		
		1	7 685/0.93	80	85			796	790	11	10 854/0.84
2	8 023/0.87	78	82	812	819	12	10 109/0.82	68	70	775	770
3	8 145/0.87	95	101	824	828	13	11 956/0.79	73	76	780	775
4	7 886/0.91	92	98	807	801	14	13 102/0.76	75	76	789	782
5	7 562/0.85	86	92	785	791	15	12 486/0.78	80	82	824	833
6	10 953/0.81	75	76	784	776	16	11 369/0.81	73	75	852	855
7	11 405/0.78	70	73	835	828	17	12 257/0.83	81	85	845	840
8	12 334/0.80	78	75	816	822	18	28 412/0.70	62	65	832	840
9	11 068/0.75	68	73	821	823	19	25 142/0.72	65	68	841	847
10	13 512/0.73	65	70	801	795	20	38 013/0.69	70	72	806	814

注：中心距为果实表面坐标与摄像机中心的最短距离，人工测量由与摄像机同轴固定的激光测距传感器获得。果径为最大果径，人工测量由手动操作游标卡尺获得。

Note: The distance in the table is measured from the center point on the fruit surface to the camera center, and the radius is the maximal one, which is manually measured by vernier caliper.

线可以有效克服温室内强太阳光、自身散射以及投射物吸收等因素影响,确保空间测量精度;基于结构光视觉空间测量原理,获取果实表面光条纹三维信息,通过灰度距离映射关系建立深度图像,据此进行重叠果实的区域分割和立体测量;试验结果表明,视觉系统单次识别测量耗时 2.8 s,果实直径测量误差小于 6 mm,果实与摄像机中心距测量误差小于 8 mm。

### 参 考 文 献

- [1] 张铁中,杨丽,陈兵旗,等. 农业机器人技术研究进展[J]. 中国科学,2010,40(增):71-87
- [2] 李寒,王库,曹倩,等. 基于机器视觉的番茄多目标提取与匹配[J]. 农业工程学报,2012,28(5):168-172
- [3] Huanyu Jiang, Yongshi Peng, Yibin Ying. Measurement of 3-D locations of ripe tomato by binocular stereo vision for tomato harvesting [C]//ASABE Annual International Meeting, St Joseph; Asabe,2008:84-880
- [4] 项荣,应义斌,蒋焕煜,等. 机基于双目立体视觉的番茄定位[J]. 农业工程学报,2012,28(5):161-167
- [5] 尹建军,毛罕平,王新忠,等. 不同生长状态下多目标番茄图像的自动分割方法[J]. 农业工程学报,2006,22(10):149-153
- [6] 项荣,应义斌. 基于边缘曲率分析的重叠番茄识别[J]. 农业机械学报,2012,43(3):157-162
- [7] 冯青春,袁挺,纪超,等. 黄瓜采摘机器人远近景组合闭环定位方法[J]. 农业机械学报,2011,42(2):154-157
- [8] Van E J. Field test of an autonomous cucumber picking robot [J]. Biosystems Engineering 2003,86(3):305-313
- [9] 袁挺,李伟,谭豫之,等. 温室环境下黄瓜采摘机器人信息获取[J]. 农业机械学报,2009,40(10):151-155
- [10] 荀一,陈晓,李伟,等. 基于轮廓曲率的树上苹果自动识别[J]. 江苏大学学报:自然科学版,2007,28(6):461-464
- [11] 周薇,冯娟,刘刚. 苹果采摘机器人中的图像配准技术[J]. 农业工程学报,2013,29(11)20-26
- [12] Cao Q, Nagata M, Gejima Y. Basic study on strawberry harvesting robot (Part I)-algorithm for locating and feature extracting of strawberry fruits[J]. Bio-Robotics, Information Technology and Intelligent Control for Bioproduction Systems, 2000,49-54
- [13] Feng Qingchun, Wang Xiu, Zheng Wengang. A new strawberry harvesting robot for elevated-trough culture[J]. Agric & Biol Eng,2012,5(2):1-8
- [14] 冯青春,刘新南,姜凯,等. 基于线结构光视觉的穴盘苗外形参数在线测量系统研制及试验[J]. 农业工程学报,2013,29(21):143-149
- [15] Feng Qingchun, Cheng Wei, Zhou Jianjun, et al. Design of structured-light vision system for tomato harvesting robot[J]. Int J Agric & Biol Eng,2014,7(2):19-26
- [16] Kawollek M, T Rath. Machine vision for three-dimensional modelling of gerbera jamesonii for automated robotic harvesting [C]//International Conference on Sustainable Greenhouse Systems Greensys. Leuven:ISHS,2005:757-764
- [17] Mikhail Sizintsev, Richard P, Wildes. Coarse-to-fine stereo vision with accurate 3D boundaries [J]. Image and Vision Computing,2010,28:352-366
- [18] Nalpantidis L, Gasteratos A. Stereo vision for robotic applications in the presence of non-ideal lighting conditions[J]. Image and Vision Computing,2010,28:940-951
- [19] 张凯良,杨丽,张铁中. 草莓采摘位置机器视觉与激光辅助定位方法[J]. 农业机械学报,2010,41(4):151-156
- [20] 冯娟,刘刚,司永胜,等. 苹果采摘机器人激光视觉系统的构建[J]. 农业工程学报,2013,29(增刊):32-37
- [21] Zeng Q B, Miao Y B, Liu C L. Algorithm based on marker-controlled watershed transform for overlapping plant fruit segmentation[J]. Optical Engineering,2009,48(2):1-10
- [22] Lei YAN, Cheol-Woo PARK. New separation algorithm for touching grain kernels based on contour segments and ellipse fitting[J]. Zhejiang Univ-Sci C (Comput & Electron),2011,12(1):54-61
- [23] Mebatsion H K, Paliwal J. Machine vision based automatic separation of touching convex shaped objects[J]. Computers in Industry,2012,63(7):723-730
- [24] 龚爱平,陈吉. 基于改进 Freeman 链码的柑橘簇生区域数量判别方法[J]. 农业机械学报,2012,43(11):203-208
- [25] 熊会元,宗志坚. 精确提取线结构光条纹中心方法[J]. 计算机工程与应用,2009,45(10):235-237
- [26] Asker M, Bazen, Sabih H. Gerez. Systematic methods for the computation of the directional fields and singular points of fingerprints[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence,2002,24(7):905-919

责任编辑:王燕华