DOI:10.3969/j.issn.1000-1298.2010.04.031

草莓采摘位置机器视觉与激光辅助定位方法*

张凯良　杨　丽　张铁中
（中国农业大学工学院，北京 100083）

【摘要】 以地垄栽培模式下的草莓为作业对象，针对草莓果实娇嫩易损的特点，采用直接撷取果柄的采摘方案，提出了一种图像处理与激光辅助测距相结合的草莓采摘位置自动定位方法。采用镜像匹配法计算草莓果轴的平面位置信息，进而在扇形激光束的辅助下，利用几何光学计算采摘位置在深度方向的距离。对自然环境下生长的长圆锥型草莓进行了试验，结果表明，对于机器人锁定采摘位置所需的导航数据，该方法的平均计算时间为381 ms，测距最大误差为1.6 mm，平均误差为0.5 mm。

关键词：草莓　采摘机器人　机器视觉　激光辅助　目标定位
中图分类号：S126；TP242.6　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1000-1298(2010)04-0151-06

Object Locating Method of Laser-assisted Machine Vision for Strawberry-harvesting

Zhang Kailiang　Yang Li　Zhang Tiezhong
(*College of Engineering*, *China Agricultural University*, *Beijing* 100083, *China*)

Abstract

An object locating method for strawberry-harvesting robot was proposed and evaluated in view of aimed at the "hill culture" planting pattern and characteristic of liable to damage for strawberry. The method includes two steps: "2-D information acquisition", during which "mirror-image match method" is used to locate the strawberry's fruit axis; "distance judgment between object and end-effector", in which laser is used to assist distance judgment. The experiment results showed that the system is suitable for locating long-conical strawberries. The average time required for locating the picking position is 381 ms, the maximum measurement error of the distance is 1.6 mm and the average error is 0.5 mm.

Key words　Strawberry, Harvesting robot, Machine vision, Laser assisted, Target location

引言

草莓的自动化收获能有效解决在盛果期果农劳动强度大、果实采收不及时易腐烂等难题，对提高农业生产效率，促进草莓产业的发展具有重要意义，而草莓的自动识别定位是其关键技术之一。目前，国内外对草莓的定位方法已有一定的研究，但多采用双CCD视觉系统定位[1~6]，这必造成系统的高成本和算法的复杂化，同时定位系统体积也较大，且对地垄栽培模式的草莓识别定位技术研究很少，中国农业大学在草莓果实目标识别、提取、定位等方面已经取得了一定成果[7~9]，但在采摘位置的精确定位以及果实的精准采摘方面有待进一步深入研究。

本文从实用角度出发，针对我国草莓生产中普遍采用的地垄栽培模式，提出一种基于激光辅助定位的草莓采摘位置机器视觉定位方法，研究重点为目标位姿、深度等导航信息的精确判断。

1　试验材料和装置

试验装置如图1所示，将2个摄像头和1个激

收稿日期：2009-03-09　修回日期：2009-04-27
* 国家自然科学基金资助项目(60375036)
作者简介：张凯良，博士生，主要从事机电一体化及草莓收获机器人研究，E-mail：zhang_kailiang@126.com
通讯作者：张铁中，教授，博士生导师，主要从事生物生产自动化及机电一体化研究，E-mail：zhangtz7@hotmail.com

光发生器安装于末端执行器上,组成定位系统。摄像头 A 位于机械爪正下方,摄像头 B 位于机械爪侧面,与机械爪成 60°夹角,激光发生器装于机械爪的正上方。两摄像头均为 CMOS 摄像头,分辨率为 320×240,距离 120 mm 处视场范围为 176 mm×132 mm;激光发生器所产生的激光波长 635 nm,扇角 90°,可在被照射物体表面形成"一"字形光斑,用来辅助判断采摘位置与末端执行器深度方向的距离。

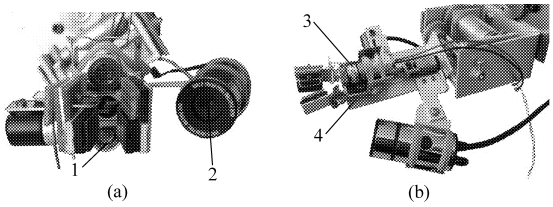

图 1 定位系统组成结构示意图

Fig. 2 Components of the object locating system

1. 摄像头 A 2. 摄像头 B 3. 激光发生器 4. 机械爪

机器人运动过程中,机械爪的前进方向始终与垄面垂直,地垄截面呈等腰梯形,垄顶宽 L_1 = 400 mm,垄底宽 L_2 = 600 mm,垄高 L_3 = 250 mm,草莓果实长出后伏在垄的侧面,如图 2 所示。观察者面向垄面,建立笛卡尔坐标系:沿垄面向右为 X 轴正方向,沿垄面向下为 Y 轴正方向,垂直垄面向里为 Z 轴正方向。设在 Z 方向上,目标与爪钳根部的坐标差值,即为末端执行器与目标的距离 D。定位系统工作过程中,首先利用摄像头 A 获取的图像信息确定目标在 $X-Y$ 平面内的位置和姿态,并利用此信息调整末端执行器位姿,使末端执行器与目标对正(机械爪位于草莓正前方,爪钳开口缝隙与果轴平行);进一步在激光辅助下,利用摄像头 B 获取的图像信息判断目标到末端执行器的距离。

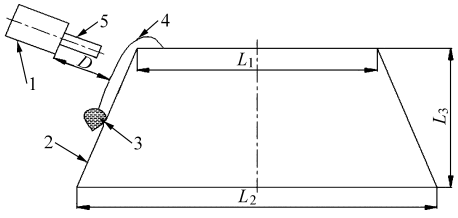

图 2 地垄截面示意图

Fig. 2 Section of the ridge

1. 机械爪 2. 垄面 3. 草莓果实 4. 果柄 5. 爪钳

2 采摘位置定位方法

2.1 在 $X-Y$ 平面内果轴位置信息的获取

对摄像头 A 采集的每一幅图像,采用图 3 所示的处理流程,获取草莓果轴在 $X-Y$ 平面内的位置信息。

2.1.1 确定预处理阈值

(1) 摄像头 A 在不同位置拍摄多组图片(试验中,分别从 12 个不同距离拍摄 12 组图片),每组随机拍摄 30 张,图中草莓随机分布。

(2) 对图像原始数据空间进行线性变换,将每个像点经过加权的感兴趣通道值映射到新空间 $C_1C_2C_3$ 中(式中 $\max S_1$、$\max S_2$、$\max S_3$ 和 $\min S_1$、$\min S_2$、$\min S_3$ 为图像执行变换 $\boldsymbol{T}$ 后的各通道最大、最小值)

$$\begin{pmatrix} C_1 \\ C_2 \\ C_3 \end{pmatrix} = 255 \cdot \begin{pmatrix} (\max S_1 - \min S_1)^{-1} & 0 & 0 \\ 0 & (\max S_2 - \min S_2)^{-1} & 0 \\ 0 & 0 & (\max S_3 - \min S_3)^{-1} \end{pmatrix} \cdot \left[\boldsymbol{T} \begin{pmatrix} B \\ G \\ R \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} \min S_1 \\ \min S_2 \\ \min S_3 \end{pmatrix} \right] \tag{1}$$

摄像头采集到的图片为 24 位的彩色位图,原始图像数据分别存放于 R、G、B 通道中,各通道中最大、最小值分别为 255 和 0。加权矩阵

$$\boldsymbol{T} = \begin{pmatrix} 0 & -1 & 1 \\ 0 & -1 & 1 \\ 0 & -1 & 1 \end{pmatrix}$$

原始图像数据空间(RGB)在执行变换 $\boldsymbol{T}$ 后,各通道数值相等,相应的最大、最小值也相等,即 $\max S_1 = \max S_2 = \max S_3 = 255$, $\min S_1 = \min S_2 = \min S_3 = -255$。经过式(1)的变换,在新的空间($C_1C_2C_3$)中,图像数据在得到加权的同时,仍然保持取值范围不变,便于在计算机上正常显示,以利于进一步研究。

(3) 统计背景区域和草莓区域在空间 $C_1C_2C_3$ 中像点的像素值范围,如图 4 所示。在各个距离下,对于背景区域的像点,像素值普遍较小,位于背景区域像素最小值和背景区域像素最大值两条曲线之间;对于草莓区域的像点,像素值普遍较大,位于草莓区域像素最小值和草莓区域像素最大值两曲线之间。

由图 4 可知,以背景区域像素最大值曲线和草莓区域像素最大值曲线作为草莓区域的分割阈值选取依据,即可从图像中将绝大部分草莓区域分割出来。但这种方法无法对像素值位于草莓区域像素最小值和背景区域像素最大值之间的像素(本文中称之为不确定区域像素)做出准确区分。

为了衡量不确定区域像素的误判对草莓目标识别的影响,对草莓区域和不确定区域在图像中所占的像素数量进行了统计,如图 5 所示。草莓区域像

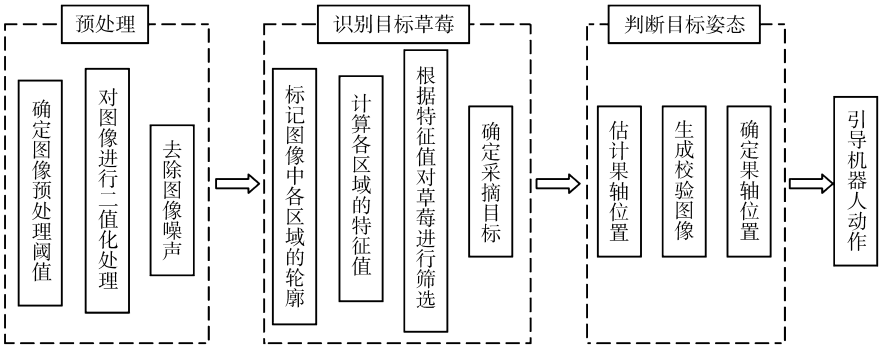

图 3　目标平面信息获取流程

Fig. 3　Task sequence of 2-D information acquisition

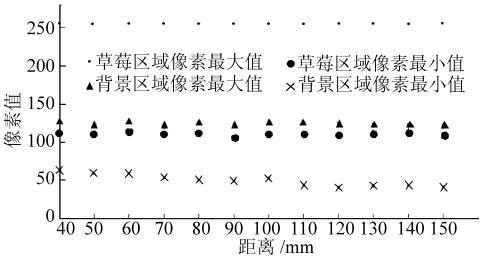

图 4　目标和背景区域像素值统计图

Fig. 4　Mean extreme pixel values in the strawberry region and the background region

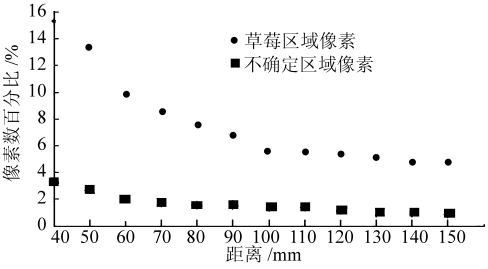

图 5　草莓区域和不确定区域像素数量优势对比

Fig. 5　Contrast of the strawberry region and the uncertain region's advantages in numbers

素数百分比曲线和重叠区域像素数百分比曲线来表示草莓区域和重叠区域的像素数量在整个图像中的比重，百分比的基数均为图像像素总数 7 680（320 × 240）。可以看出，在各个距离下，草莓区域在图像中的像素数量远远多于不确定区域在图像中的像素数量。采用本文方法进行图像预处理对不确定区域像点的误判，对整个目标识别工作影响微小，并且可在接下来的目标定位步骤中会将其不良因素完全消除。

2.1.2　识别目标草莓

对二值图像进行独立区域的特征值计算（包括区域面积、区域周长、区域圆形度、区域重心位置），根据特征值进一步去除非草莓图像区域。若多个区域被认为是成熟草莓，则依重心在图像中的位置确定优先权，由此在图像中确定唯一目标，权值最高的成熟草莓优先采摘，权值稍低的成熟草莓将在下一轮的扫描中被确定为目标。

2.1.3　确定目标草莓姿态

目标姿态以其果轴在摄像头 A 图像中的位置来衡量，采用镜像匹配法来判定草莓果轴位置。

（1）估计果轴位置

标记目标轮廓横坐标极值点，过两个极值点绘制分界直线，若区域重心位于分界线上方，则忽略轮廓横极值点并过重心绘制水平直线作为分界直线。根据草莓生长特点，认为果轴只可能位于分界直线上方且与轮廓相连，将这部分轮廓视为感兴趣轮廓。通过感兴趣轮廓的各点绘制过重心的直线，将这些直线作为待验直线，其中一条即为果轴（图 6）。

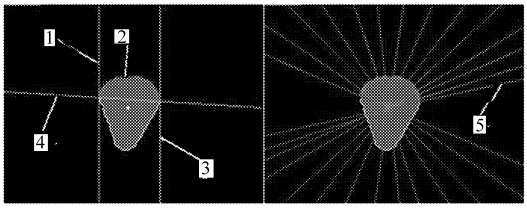

图 6　目标果轴位置估计示意图

Fig. 6　Estimating of the position of fruit axes

1. 轮廓横坐标最小值　2. 感兴趣轮廓　3. 轮廓横坐标最大值　4. 分界直线　5. 待验直线

（2）生成校验图像组

为每条待验直线生成校验图像 a 和校验图像 b，组成校验图像组。校验图像 a 由完整的目标草莓区域图像减去待验直线左侧的部分得到；校验图像 b 由被校验直线左侧部分图像以被校验直线为基准通过镜像得到（图 7）。

（3）确定果轴位置

校验图像组的相似程度用一个相似度评价系数 K 来衡量，K 在 0 ~ 1 间取值，即

$$K = \frac{\sum_{x,y} [A(x,y) - B(x,y)]^2}{\sqrt{\sum_{x,y} A(x,y)^2 \sum_{x,y} B(x,y)^2}} \tag{2}$$

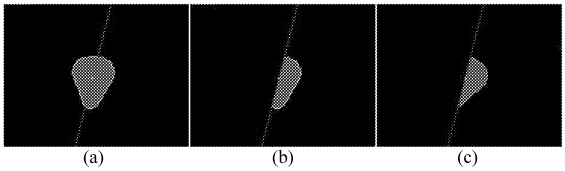

图 7 校验图像组生成示意图

Fig. 7 Generation process of the sample couple

(a) 完整草莓区域图像 (b) 校验图像 a (c) 校验图像 b

其中 $A(x, y)$ 和 $B(x, y)$ 分别表示校验图像 a 和校验图像 b 在坐标 (x, y) 处的值，K 越小则表示两幅图片相似程度越高。比较各校验图像组，将最小 K 值所对应的待验直线定为目标果轴位置。

摄像头 A 采集的原始图片以及经过上述各步骤处理后所得的图像信息如图 8 所示。

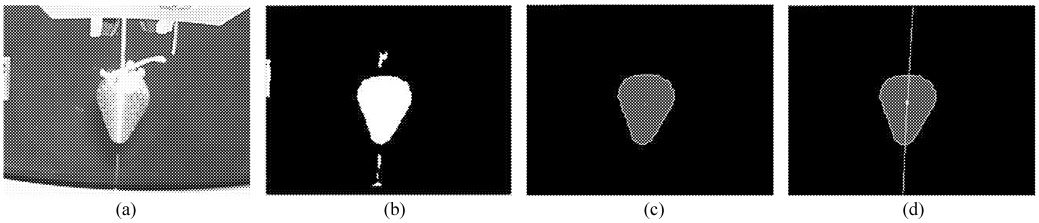

图 8 平面信息获取各步骤效果图

Fig. 8 Processing results of each step during 2-D information acquisition

(a) 原图像 (b) 预处理后 (c) 特征值计算后 (d) 确定果轴位置后

2.2 深度信息的获取

根据摄像头 A 得到的信息，调节末端执行器的位姿，使机械爪正对草莓果柄处，而后由摄像头 B 与激光器共同执行测距任务。

测距原理如图 9 所示，摄像头 B 可抽象为一个感光器件与一个凸透镜的组合，S 为被测点（即目标草莓表面上与末端执行器最近一点，如图 10 所示），S' 为被测点在感光器件平面上的像点，d 为 S' 在感光器件平面上的 X 坐标偏移量，M 为机械爪轴线与凸透镜抽象平面的交点，透镜焦距为 f，O 为透镜光心，l 为 M 到 O 的距离，P 为 M 与机械爪前端面的距离。透镜主光轴与爪身轴线成 θ 角（定值），由几何光学原理可知，末端执行器前进的过程中，S' 在感光器件上的水平位置（即 d 值）随 D 的变化而变化。

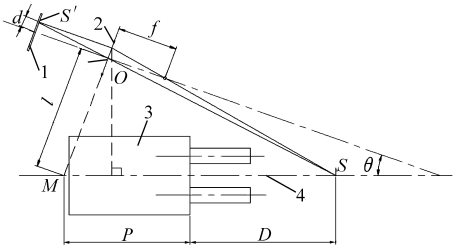

图 9 目标定位法距离判断原理图

Fig. 9 Distance judgment principle of the locating method

1. 感光器件 2. 凸透镜 3. 机械爪 4. 爪身轴线

经推导，可得 d 与 D 的理论关系式为

$$D = (l + d)\left[\frac{f\cos\theta - d\sin\theta}{d + f\tan\theta} + \sin\theta\right] - P \qquad (3)$$

基于上述原理，根据摄像头 B 所摄图像中的激光线各点水平坐标值，可计算出激光所照射的草莓表面与末端执行器的距离。在实际工作中，由于摄像头和末端执行器自身的系统误差以及式中常数不易精确测得，直接使用式(3)计算所得的 D 值存在较大误差。在该定位方法中，以式(3)为基础建立数学模型为

$$D = [k(X - 160) + a]\left[\frac{b - ck(x - 160)}{k(x - 160) + e} + c\right] + g \qquad (4)$$

X 表示该点在摄像头 B 图像中的水平坐标，k、a、b、c、e、g 为待定系数，其确定过程如下：

(1) 令末端执行器正对目标草莓，激光线照射在草莓表面与果轴方向重合，测距过程中摄像头 A 和 B 所摄图像如图 10 所示。以 D 最小值为 30.078 mm，最大值为 127.020 mm，每隔 1.078 mm 用摄像头 B 拍摄一张图像，重复 10 次，得 10 组共 900 张图像。

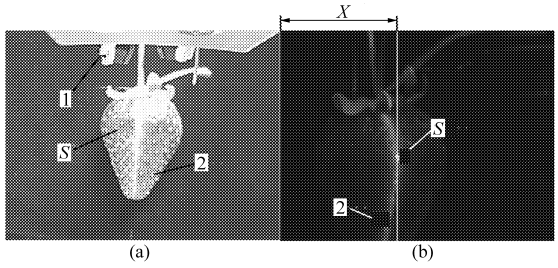

图 10 测距过程中两个摄像头所拍摄的图像

Fig. 10 Images captured by the two cameras during distance judgment

(a) 摄像头 A 所拍图像 (b) 摄像头 B 所拍图像

1. 机械爪 2. 激光线

(2) 提取目标被测点 S 在摄像头 B 视野中的水平偏移量，即图 10b 中激光线 X 坐标最大值，得到 90 组 D 和 X 的对应关系 $\{(D_i, X_i) \mid i = 1, 2, \cdots, 90\}$。

（3）以 $\{(D_i, X_i) \mid i = 1, 2, \cdots, 90\}$ 作为样本，使用 Gauss－Newton 法对式（4）进行非线性最小二乘数据拟合，确定该定位法的距离测量公式

$$D = [0.022\,3(X-160)+86.415\,0]\cdot\left[\frac{5.764\,5-0.015\,9(X-160)}{0.022\,3(X-160)+8.393\,5}+0.713\,9\right]-58.507\,0 \tag{5}$$

数据拟合结果如图 11 所示，拟合曲线与样本的平均偏差为 0.181 3 mm，最大偏差为 0.521 7 mm，理论模型与样本基本吻合。

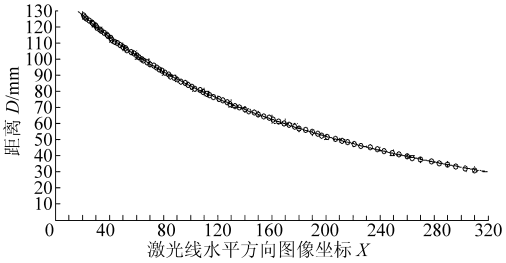

图 11　目标定位系统测距公式参数拟合结果

Fig. 11　Data fitting results of the distance judgment formula

2.3　采摘位置的确定

将果轴与果实轮廓上方交点作为果萼位置，果萼位置沿果轴向上 5～20 mm 处的一段果柄作为机械爪的采摘位置。如图 12 所示，设末端执行器到采摘位置在 Z 方向上的距离为 D_P；草莓果实在垄面上投影的最大宽度为 W，S 点到垄面的距离为 Q。采摘位置靠近果实，其到垄面的距离近似等于 S 点到垄面距离的一半，即 $Q/2$，进而可得 $D_P = D + Q/2$；由于本文的定位方法以长圆锥型草莓为研究对象，近似认为 $W = Q$；摄像头 A 在测距任务执行中始终正对草莓果实，特定距离下摄像头 A 采集的图像中，草莓区域在 X 方向上的最大尺度 W'（以像素数为单位）与 W 成线性关系，在该定位法中，采用 $D = 40$ mm 时的 W' 来确定 W 值，经试验标定 $W = 0.28W'$。综上，得出在 $D = 40$ mm 时，采摘位置到末端执行器的距离计算公式为

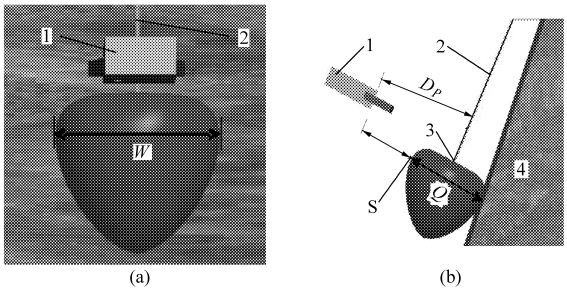

图 12　采摘位置确定示意图

Fig. 12　Schematic diagram of locating the picking point

1. 机械爪　2. 果柄　3. 果萼位置　4. 地垄

（a）正面　（b）侧面

$$D_P = 40 + 0.14W' \tag{6}$$

草莓采收机器人目标定位系统，以引导末端执行器上的机械爪，在不碰触果实的情况下准确夹持采摘位置处的果柄为目的，采用分步定位、导航的方法实现功能，单次定位过程如图 13 所示。

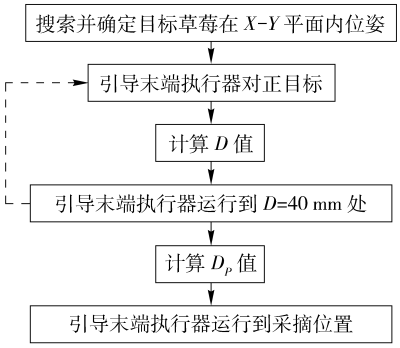

图 13　采摘位置确定流程简图

Fig. 13　Basic flow chart of locating the picking point

3　试验验证

普通日光灯照明条件下，以 90 颗成熟“丰香”草莓为对象，分 9 组（每组 10 颗），在 9 个不同位置，对该定位方法进行试验。

草莓果轴位置检测结果数据如图 14 所示，图 14b波谷处所对应的轮廓点序号将被认为是果轴所过的轮廓点，对于不同距离下切片曲线均有类似结果，即：果轴所经过的感兴趣轮廓点序号有效收敛于波谷处。试验结果显示，该定位方法可有效检测长圆锥型草莓的果轴，最大计算时间 630 ms，平均计算时间 350 ms。

目标距离测量试验结果如图 15 所示，试验结果显示，该定位方法的测距最大误差为 1.6 mm，平均误差 0.5 mm，80% 以上的测量结果误差小于 1 mm。

对上述 9 组草莓进行了果柄夹持试验，机器人锁定采摘位置所需的导航数据（包括 $X-Y$ 平面内目标位姿判断，D、D_P 值的计算）平均计算时间为 381 ms，果柄夹持成功率在 90% 以上，如表 1 所示。

表 1　采摘点夹持试验结果

Tab. 1　Results of picking-point grasping experiment

参数	组序号								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
导航数据计算时间/ms	366	374	398	384	377	389	361	388	392
果柄夹持成功数	8	10	9	9	8	10	9	10	10

4　结束语

针对我国草莓地垄式种植模式和草莓果实易受损伤的特点，基于直接撷取果柄的采摘方案，提出了

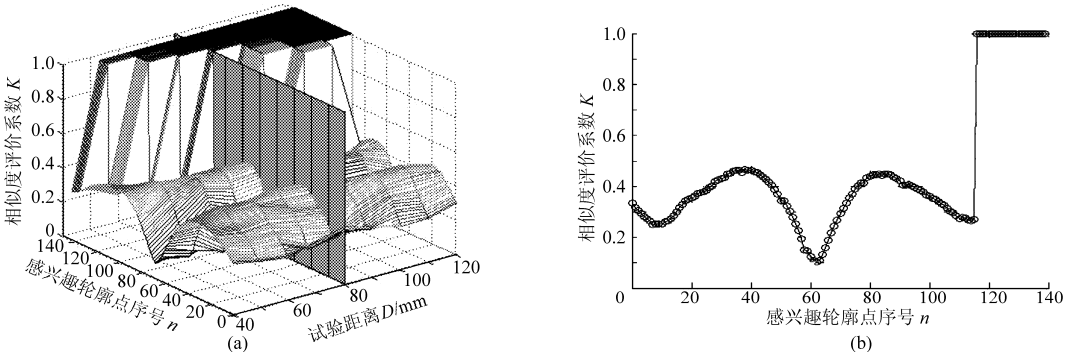

图 14 目标定位法的果轴检测试验结果

Fig. 14 Results of fruit axis location experiment

(a) 各组感兴趣轮廓点与草莓重心连线(待验直线)对应 K 值 3D 图 (b) 图 14a 在试验距离为 80 mm 处的切片

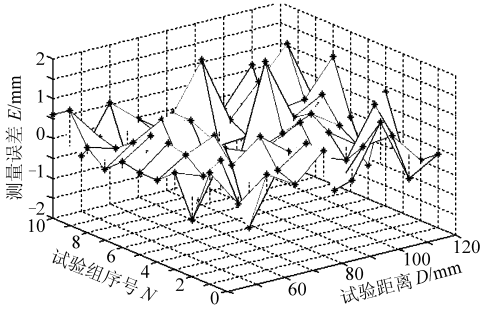

图 15 目标定位法测距试验结果

Fig. 15 Results of distance judgment experiment

一种采用图像处理与激光辅助测距相结合的草莓采摘位置的自动定位方法。可实现长圆锥型草莓采摘位置的有效定位,最大误差为 1.6 mm,平均误差为 0.5 mm,80% 以上的测量误差小于 1 mm,精度满足以夹持并剪切果柄为采收方式的草莓精准采摘要求。采用该方法采摘位置的定位准确率可达 90%,平均导航数据计算时间为 381 ms。由于采用小型 CMOS 摄像头与激光器相配合,该方法在保证定位精度的同时降低了成本,减小了设备体积。

参 考 文 献

1 Kondo N, Hisaeda K, Monta M. Development of strawberry harvesting robot hand[C]. ASAE Paper 983117, 1998.

2 Kondo N. Fruit grading robot[C]// Proceedings of the 2003 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, 2003:1 366 ~ 1 371.

3 Kondo N, Monta M, Arima S. Strawberry harvesting robot on hydroponic system[C]// Proceedings of 3rd IFAC/CIGR Workshop on Artificial Intelligence in Agriculture, 1998:194 ~ 198.

4 Kenji Hatou, Matsuura H, Hshimoto Y. Harvesting support database based on image recognition[J]. Agricultural Information Technology in Asia and Oceania, 1998:193 ~ 194.

5 Paula Tarrío, Ana M. Bernardos, José R, Casar, et al. A harvesting robot for small fruit in bunches based on 3-D stereoscopic vision[C]// Computers in Agriculture and Natural Resources, Proceedings of 4th World Congress Conference, Orlando, Florida, 2006 701P0606.

6 Guo Feng, Cao Qixin, Nageta Masateru, et al. Fruit detachment and classification method for strawberry harvesting robot[J]. International Journal of Advanced Robotic Systems, 2008,5(1):41 ~ 48.

7 张铁中,陈利兵,宋健. 草莓采摘机器人的研究:基于图像的草莓重心位置和采摘点的确定[J]. 中国农业大学学报, 2005,10(1):48 ~ 51.
Zhang Tiezhong, Chen Libing, Song Jian. Strawberry harvesting robot: Ⅱ. images based identifications of strawberry barycenter and plucking position[J]. Journal of China Agricultural University, 2005, 10(1):48 ~ 51. (in Chinese)

8 张铁中,周天娟. 草莓采摘机器人的研究:Ⅰ.基于 BP 神经网络的草莓图像分割[J]. 中国农业大学学报,2004,9(4):65 ~ 69.
Zhang Tiezhong, Zhou Tianjuan. Strawberry harvesting robot: Ⅰ. Segmentation of strawberry image by BP neural network [J]. Journal of China Agricultural University, 2004, 9(4):65 ~ 68. (in Chinese)

9 张铁中,林宝龙,高锐. 水果采摘机器人视觉系统的目标提取[J]. 中国农业大学学报, 2004,9(2):68 ~ 72.
Zhang Tiezhong, Lin Baolong, Gao Rui. Object extraction for the vision system of fruit picking robot[J]. Journal of China Agricultural University, 2004, 9(2):68 ~ 72. (in Chinese)