

DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.09.031

高架草莓采摘机器人设计与试验*

张凯良¹ 杨丽¹ 王粮局¹ 张丽霞² 张铁中¹

(1. 中国农业大学工学院, 北京 100083; 2. 邢台广播电视大学文经系, 邢台 054000)

【摘要】 设计了一款针对高架栽培模式的草莓采摘机器人。该机器人由履带式行走机构、基于机器视觉的精密运动定位机构和一个可同步剪切夹持草莓果柄的末端执行器等机构组成,采用以 ARM9 为核心的分层式控制系统。温室内实地试验表明该机器人能够自主识别、定位并无损伤采摘高架栽培模式下的成熟草莓,采摘成功率可达 88%,采摘单颗草莓时间为 18.54 s。

关键词: 草莓 采摘机器人 高架栽培

中图分类号: S126; TP242.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2012)09-0165-08

Design and Experiment of Elevated Substrate Culture Strawberry Picking Robot

Zhang Kailiang¹ Yang Li¹ Wang Liangju¹ Zhang Lixia² Zhang Tiezhong¹

(1. College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China

2. Department of Law, Xingtai Open University, Xingtai 054000, China)

Abstract

A strawberry-picking robot was developed, consisting of a crawler walking mechanism, a machine vision based precision motion positioning mechanism, and an end-effector cutting and gripping strawberry peduncles synchronously, for application to an elevated substrate culture. And the robot was controlled by a layering control system whose kernel was ARM9. The field test in greenhouse indicated that the robot could recognize, locate and pick ripe strawberries in elevated substrate culture with the success rate of 88%, without damaging the fruits, and the execution time of a single pick cycle was 18.54 s.

Key words Strawberry, Picking robot, Elevated substrate culture

引言

采摘作业在草莓产业中占有重要地位,草莓的整个种植生产过程中约有 1/4 的时间被草莓采摘所占用^[1],并且由于草莓果实成熟后必须尽快采摘,盛果期采摘作业的劳动强度大,将自动化技术引入草莓采摘作业环节,研发草莓采摘机器人成为亟待解决的问题。

日本冈山大学^[2-5]、宫崎大学^[6]、美国佛罗里达大学^[7]、我国上海交通大学^[8]和中国农业大学^[9-10]相继开展了草莓采摘机器人的研究工作。日本国家

农业机构研究所和 SI Seiko 公司于 2009 年联合研制出了能够自动识别并采摘成熟草莓果实的机器人样机^[11-13]。目前国内外草莓采摘机器人研究中尚存在以下问题:①普遍采用多目机器视觉系统,结构复杂,成本较高。②整体机构庞大,工作过程中占用较多行走空间,影响种植密度。③面向我国国内草莓生长环境特点的采摘机器人研究较少,尚无样机问世。

针对国内外草莓生产、研究现状,本文对适用于我国高架栽培草莓的采摘机器人进行研究设计,制造样机并进行实地采摘试验。

收稿日期:2012-03-26 修回日期:2012-04-04

* 国家自然科学基金资助项目(61075098)和中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2012XJ002)

作者简介:张凯良,讲师,博士,主要从事特种机器人、机电一体化研究,E-mail: zhang_kailiang@cau.edu.cn

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研究,E-mail: zhangtz56@hotmail.com

1 结构和原理

1.1 工作环境

我国草莓高架栽培模式多用于温室(图1),高架栽培床高105 cm,宽40 cm,长度可依照日光温室的空间布局进行设计,每个栽培床顶部生长2行草莓,果实成熟后分别从栽培床两侧垂下;相邻2个高架栽培床之间有宽78 cm的过道,可作为采摘机器人的行走通道;鉴于草莓的生长特点和农艺管理特点,能够保证绝大多数草莓成熟后果实悬挂在距离栽培床上沿不超过20 cm处。

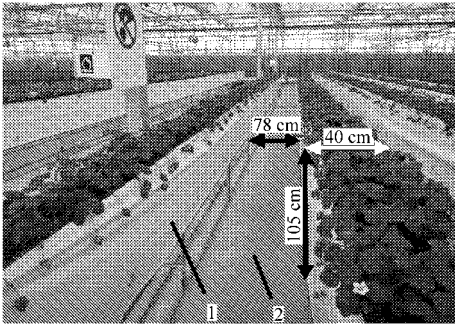


图1 温室高架草莓栽培环境

Fig. 1 Planting environment of strawberries in elevated substrate culture

1. 高架栽培床 2. 过道

1.2 总体结构

1.2.1 机器人机械系统整体设计

草莓采摘机器人由精密运动定位机构、末端执行器、框架、履带式行走机构、果篮托盘以及控制箱组成,如图2所示,外形尺寸为106 cm(长)×42 cm(宽)×140 cm(高),总质量76.5 kg。

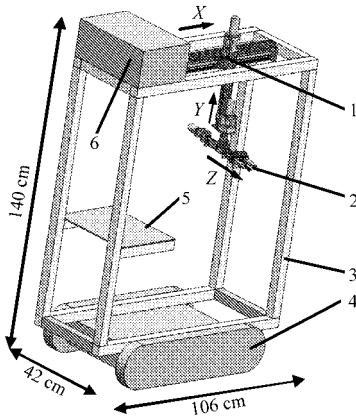


图2 草莓采摘机器人机构示意图

Fig. 2 Sketch of mechanism of strawberry picking robot

1. 精密运动定位机构 2. 末端执行器 3. 框架 4. 履带式行走机构 5. 果篮托盘 6. 控制箱

工作过程中,机器人行走于过道中央,为方便叙述,定义参考坐标系:过道延伸方向(即机器人前进方向)为 X 轴正方向,垂直地面向上为 Y 轴正方向;

垂直且指向采摘目标所在的栽培床侧表面为 Z 轴正方向,在机器人作业过程中,该方向将会随实际采摘目标的变化而改变;机器人摄像头所拍摄图像坐标的 x,y 方向与参考坐标系的 X,Y 方向定义一致。

框架由铝合金型材固连而成,用于支撑连接机器人各机械部件;履带式行走机构用于负载整个机器人,并进行较大范围移动;果篮托盘为40 cm×40 cm的正方形平面,通过铝型材与框架固连,用于放置草莓收纳容器;工控箱与框架上表面固连,内置电源、控制器、驱动器等电子设备,用于接收数字图像等机器人反馈信息、计算机器人导航数据以及控制机器人各执行机构运动。精密运动定位机构和末端执行器较为复杂,在后面详述。

1.2.2 精密运动定位机构设计

精密运动定位机构用于局部范围内精密调节末端执行器和采摘目标的相对位置,包含3个平动自由度和1个旋转自由度,如图3所示。

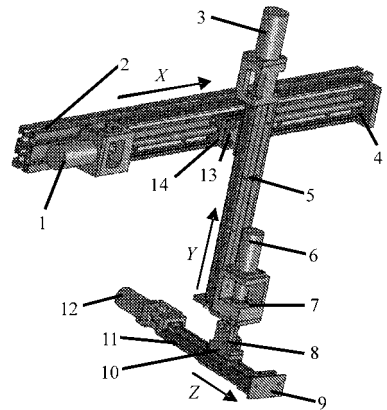


图3 精密运动定位机构示意图

Fig. 3 Sketch of precision motion positioning mechanism

1. 电动机 1 2. 横梁 3. 电动机 2 4. 丝杠导轨模组 1 5. 丝杠导轨模组 2 6. 电动机 4 7. 电动机支架 8. 旋转法兰 9. 固定法兰 10. 滑块 11. 丝杠导轨模组 3 12. 电动机 3

横梁与丝杠导轨模组1平行放置且固连,滑块1、滑块2、滑块3分别与丝杠导轨模组1、丝杠导轨模组2、丝杠导轨模组3配合;丝杠导轨模组1与丝杠导轨模组2垂直放置,滑块1与滑块2固连;电动机4通过电动机支架与丝杠导轨模组2的一端固连,电动机4的输出轴与旋转法兰固连,旋转法兰与滑块3固连。在电动机1的驱动下,丝杠导轨模组2随滑块1沿 X 方向平动;在电动机2的驱动下,整个丝杠导轨模组2和电动机4一同相对于滑块2沿 Y 方向平动;在电动机3的驱动下,丝杠导轨模组3可相对于滑块3沿 Z 方向平动。

末端执行器通过固定法兰与精密运动定位机构固连,精密运动定位机构通过横梁与框架顶端固连。电动机1、电动机2、电动机3搭配增量式编码器,控

制系统可对其进行闭环控制,从而实现末端执行器沿 X 、 Y 、 Z 方向的精确平动,有效行程分别为 X 方向 420 mm、 Y 方向 300 mm 和 Z 方向 220 mm,最高速度分别为 0.15 m/s、0.08 m/s 和 0.01 m/s;电动机 4 搭配绝对式编码器,可带动丝杠导轨模组 3 连同末端执行器一同在水平面内旋转,最高转速 42 r/min,最大行程 360°。

1.2.3 末端执行器设计

末端执行器长 14 cm,宽 7 cm,高 5.5 cm,由 1 个机械爪、1 个摄像头、1 个刀片和 1 对光纤传感器组成,如图 4 所示,能够以剪切并夹持果柄的方式摘取草莓。摄像头位于机械爪正下方,用于判断采摘目标与末端执行器在 X 、 Y 方向上的位置偏差;光纤传感器 a 与光纤传感器 b 分别位于爪钳 a 和爪钳 b 的前端,用于探测两爪钳之间是否存在果柄;刀片固连在爪钳 a 前端,刃口正对爪钳 b 前端的纳刀槽,用于在机械爪闭合同时切断果柄;夹持面是指位于爪钳 b 纳刀槽下方且面向爪钳 a 的部分表面与爪钳 a 上与之相对的表面,在目标果柄被切断后与果柄发生接触可将果实夹持,在竖直方向上其高度为 5 mm。

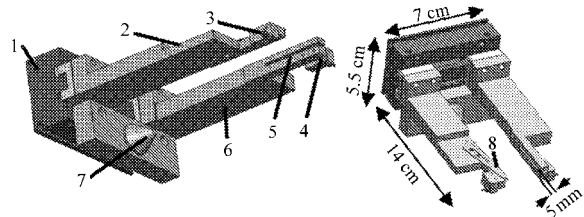


图 4 末端执行器机构示意图

Fig.4 Sketch of end-effector

- 1. 机械爪 2. 爪钳 a 3. 光纤传感器 a 4. 光纤传感器 b 5. 纳刀槽 6. 爪钳 b 7. 摄像头 8. 刀片

机械爪由压缩空气驱动,采用 6 mm 直通 PU 管接头,开合一次的排气量为 90 mL,在气源压强为 405.2 kPa,环境温度为 5 ~ 60℃ 时闭合时间 $T = 50$ ms,最大夹持力为 39 N。机械爪闭合过程可分 4 个阶段,各阶段机械爪最终状态如图 5 所示。

第 1 阶段,末端执行器运动到采摘位置,果柄位于两爪钳之间,机械爪准备闭合,此时两爪钳间距为 D_o ;第 2 阶段,两爪钳对称相向运动,直到刀片刃口接触果柄,即将进行切割动作,此时爪钳间距为 D_T ;第 3 阶段,两爪钳继续对称相向运动,直到果柄被完全切断,此时爪钳间距为 D_c ;第 4 阶段,两爪钳继续对称相向运动,刀片刃口逐渐进入纳刀槽中,直到机械爪的夹持力达到最大,此时被采摘的草莓果实从果柄处被可靠的夹持,爪钳间距为 D_s 。

由于果柄被切断后果实将连同剩余果柄在重力作用下掉落,为保证机械爪能够及时将果柄夹持,针

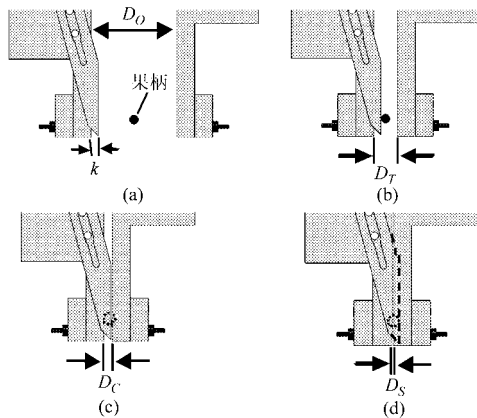


图 5 机械爪闭合过程示意图

Fig.5 Sketch of closure process of gripper

- (a) 第 1 阶段最终状态 (b) 第 2 阶段最终状态
- (c) 第 3 阶段最终状态 (d) 第 4 阶段最终状态

对末端执行器的设计参数进行了专门校验。

两机械指相对运动速度

$$v = \frac{D_o}{T} \quad (1)$$

假设果柄刚接触刀刃即完全断开,则下落时间为

$$t = \frac{D_T - D_s}{v} \quad (2)$$

由牛顿第二定律可导出草莓及其果柄下落距离

$$h = \frac{1}{2}gt^2 \quad (3)$$

式中 g ——重力加速度

联立式(1)、(2)、(3)可导出

$$h = \frac{1}{2}g \left[\frac{(D_T - D_s)T}{D_o} \right]^2 \quad (4)$$

由图 5 中几何关系可知

$$\begin{cases} D_T = 2k + d \\ 0 < D_s < k \end{cases} \quad (5)$$

式中 d ——果柄截面直径

k ——刀片刃口伸出夹持面的距离

保守计算,取 $D_s = 0$,并将式(5)代入式(4)得

$$h = \frac{1}{2}g \left[\frac{(2k + d)T}{D_o} \right]^2 \quad (6)$$

在温室中对 100 颗成熟草莓果柄直径进行了随机抽测,测试品种为“章姬”,统计出 d 值最小为 1.6 mm,最大为 2.4 mm,均值 2.0 mm。

取 $g = 9.8 \text{ m/s}^2$,根据末端执行器的设计参数可知 $D_o = 24 \text{ mm}$, $k = 2.5 \text{ mm}$ 。由式(6)可知,在 [1.6, 2.4] 内, h 随 d 单调递增,保险起见,取 $d = 2.4 \text{ mm}$ 。

将各参数值代入式(6)计算得 $h = 1.16 \text{ mm}$,该值即为最保守估计下,果柄被切断后果实下落距离,由于该值远小于机械爪夹持面在竖直方向的高度,

因此末端执行器能够在切断目标果柄后及时将其可靠夹持。

1.3 控制方案

1.3.1 机器人控制系统设计

高架草莓采摘机器人控制系统按功能划分为：信息采集层、运算控制层、运动执行层，如图6所示。

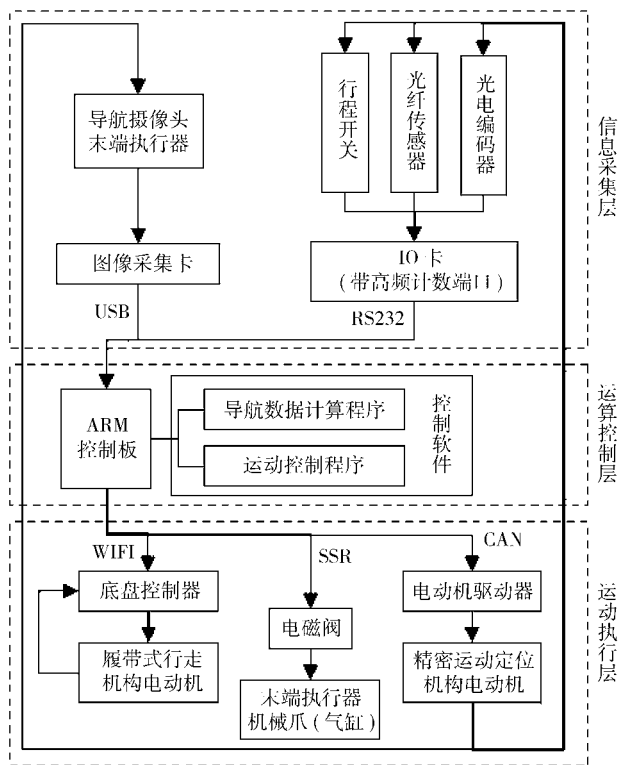


图6 机器人控制系统结构框图

Fig. 6 Control system structure of the robot

信息采集层由安装在末端执行器上的摄像头、光纤传感器、安装在各丝杠导轨模组两端的行程开关、安装在各电动机上的旋转编码器、图像采集卡、IO卡等设备组成；均采用5V独立直流电源供电；负责机器人自身的位姿数据，以及目标的几何特征、位置、环境等信息的采集。运算控制层由一块以S3C2440A(ARM9)芯片为核心的控制板(12V独立直流电源供电)以及运行在其中的控制软件构成；具有多种形式的通信接口，负责接收信息采集层发来的数据信息，并向运动执行层发送与导航数据相应的运动控制信号。运动执行层由精密运动定位机构驱动电动机、行走机构驱动电动机和末端执行器的机械爪气缸(405.2kPa以上压缩空气驱动)以及相应的驱动电路模块(24V独立直流电源供电)组成，负责实时响应运动控制层发来的控制信号，驱动机器人机构执行所需动作。履带式行走机构选用上海中为LeoBot-T型机器人底盘产品，自身带有底盘控制器，并与行走电动机形成闭环控制单元，只需接收运算控制层发来的行走指令便能准确地执行直行

或转弯动作；而精密运动定位机构的电动机则与信息采集层中的各传感设备形成闭环控制系统，从而保障采摘动作精准可靠。

1.3.2 机器人控制软件设计

机器人控制软件采用C语言进行开发，常驻于运算控制层的ARM控制板中，通过穿插调用导航数据计算和运动控制两种功能类型的程序对机器人的整个采摘作业过程进行闭环控制。沿X方向，即过道的延伸方向，将机器人的作业区域进行划分，每间隔400mm为一个工位，工位序号记为 m (最小值为1)，最大值为 M ，当过道及两侧高架栽培床的长度为 L 时 $M=L/400$ (取整数部分)。沿X的正方向在丝杠导轨模组1上取4个分割点，它们距离起始端的距离依次为60、160、260、360mm，当精密运动定位机构满足下面条件，即：滑块1位于4个分割点之一、滑块2位于丝杠导轨模组2的行程中间、滑块3位于丝杠导轨模组3上距离末端执行器最近的一端时，机器人处在一个“采摘准备位”上，采摘准备位的序号记为 s ， $s \in \{1, 2, 3, 4\}$ 。当一个工位中存在采摘目标时，行走机构保持静止，仅精密运动定位机构带动末端执行器进行目标的采摘和收纳动作，当一个工位的目标采摘完毕后行走机构将机器人带到下一工位。当控制软件判断出当前 m 值大于等于预设的 M 时，机器人将由去程模式转为返程模式，以摘取过道另一侧高架栽培床侧壁上的成熟草莓果实，具体包括重置标志参数、翻转坐标系X、Z轴方向以及电动机4精确旋转带动末端执行器调转180°等操作。机器人一次性全自动采摘一条过道两侧的成熟草莓的控制软件流程如图7所示。

本文将果实着色程度为7分及以上的草莓定义为采摘目标^[14]，在目标识别中采用了计算独立区域特征值和色差运算的方法，在目标果轴及其采摘点位置判断中利用了“镜像匹配法”，并在电动机的运动控制中采用拟人仿生控制方法^[9-10]。

目标识别及其采摘点位置计算共分3个步骤完成，分别是图像预处理、目标草莓识别和采摘点位置计算，如图8所示。

在图像预处理过程中，采用了采样试验的方法标定目标草莓果实特征，包括色彩特征和几何特征。其中色彩特征是图像二值化的依据，用于图像中草莓果实和背景分离；几何特征是目标识别的依据，用于确定采摘目标。具体步骤为：

(1) 采用与机器人所用同规格的摄像头，距离高架栽培床侧表面34cm处(即处于采摘准备位时机器人摄像头与栽培床侧表面的距离)，随机拍摄样本图像100张，图像中草莓果实随机分布。

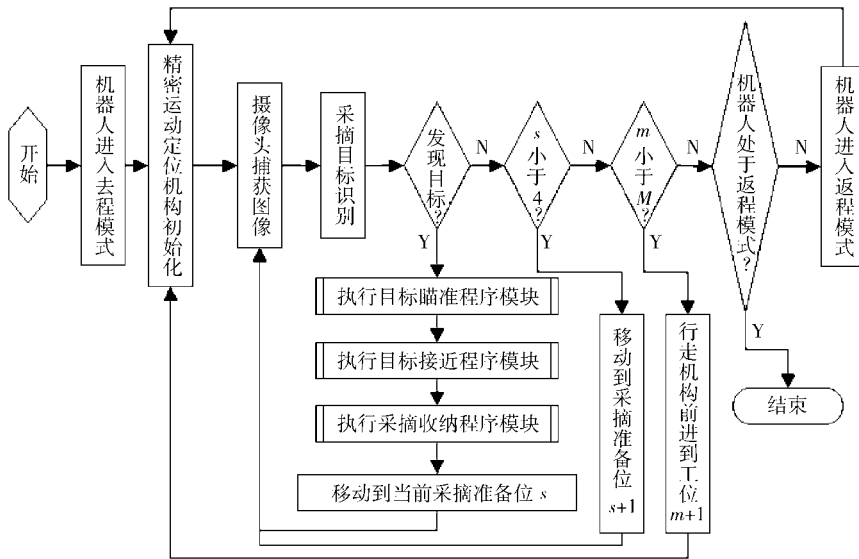


图7 机器人控制软件流程图

Fig.7 Flow chart of robot software

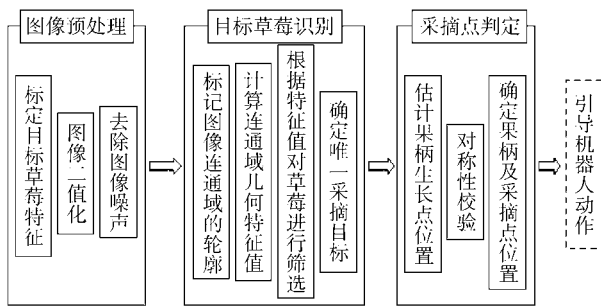


图8 目标识别及采摘点定位流程图

Fig.8 Process of object recognition and picking-point location

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

(3) 统计图像中背景区域和目标草莓区域在空间 $C_1C_2C_3$ 中像点的平均像素值 V_B 和 V_o 。

(4) 以 V_B 和 V_o 的均值作为分割阈值对图像进行二值化处理,在二值图像中进一步标定目标果实连通域平均面积 S_d (单位:像素)和圆形度最小值 C_{min} 。

在目标识别过程中,根据预处理所生成的二值图像以及标定的采摘目标几何特征,对图像中的连通域进行校验:将面积大于等于 S_d 同时圆形度大于等于 C_{min} 的区域判定为成熟果实区域;将面积大于等于 S_d 但圆形度小于 C_{min} 的区域判定为多个果实邻接而成的区域,并通过分水岭算法进一步将其划分为独立的果实区域;将面积小于 S_d 的区域判定为干扰区域,并将其从图像中去除。如果图像中同时存在 2 个及以上的成熟果实区域,则进一步比对连通域重心图像坐标,将 x 坐标较小的区域判定为目标草莓区域优先采摘,并暂时将其他连通域从图像中去除。

采摘点判定过程以目标识别过程所生成的结果图像为计算对象,在目标草莓区域的几何特征基础上进一步估计采摘点的图像坐标,具体操作如下:

(1) 估计果柄生长点位置

标记目标轮廓横坐标极值点,过 2 个极值点绘制分界直线,若区域重心位于分界线上,则忽略轮廓 x 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,认为果柄只可能位于分界直线上且与轮廓相连,将这部分轮廓上的点定义为“待验果柄生长点”(图 9)。

(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 $C_1C_2C_3$ 空间。

RGB 空间到 $C_1C_2C_3$ 空间变换公式为

$$\begin{pmatrix} C_1 \\ C_2 \\ C_3 \end{pmatrix} = 255 \left[T \begin{pmatrix} B \\ G \\ R \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} -\min S_1 \\ -\min S_2 \\ -\min S_3 \end{pmatrix} \right] \left/ \begin{pmatrix} \max S_1 - \min S_1 \\ \max S_2 - \min S_2 \\ \max S_3 - \min S_3 \end{pmatrix} \right. \quad (7)$$

式中 C_1, C_2, C_3 —— $C_1C_2C_3$ 空间分量

$\max S_1$ —— C_1 通道最大像素值

$\max S_2$ —— C_2 通道最大像素值

$\max S_3$ —— C_3 通道最大像素值

$\min S_1$ —— C_1 通道最小像素值

$\min S_2$ —— C_2 通道最小像素值

$\min S_3$ —— C_3 通道最小像素值

加权矩阵 T 取值为

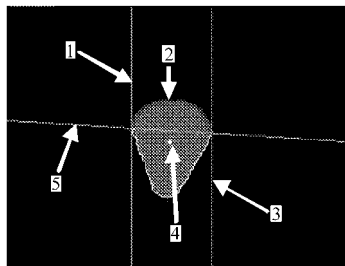


图9 果柄生长点位置估计示意图

Fig.9 Sketch of estimating growing position of peduncle

1. 轮廓 x 坐标最小值 2. 待验果柄生长点 3. 轮廓 x 坐标最大值
4. 重心 5. 分界直线

(2) 生成校验图像组

过重心和每一个“待验果柄生长点”绘制直线, 将这条直线定义为“待验直线”, 基于每一条待验直线生成校验图像组, 其中: 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, 如图 10 所示。

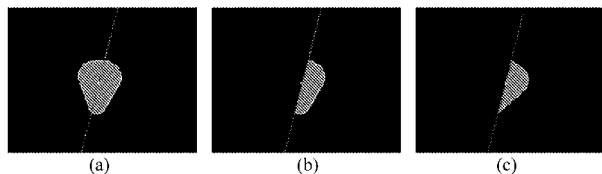


图10 校验图像组生成示意图

Fig.10 Generation process of sample couple

(a) 完整草莓区域图像 (b) 校验图像 a (c) 校验图像 b

(3) 对比检验图像组的相似度, 确定实际生长点位置

“校验图像组”的相似度以一个相似度评价系数 K 来衡量

$$K = \frac{\sum_{x,y} [A(x,y) - B(x,y)]^2}{\sqrt{\sum_{x,y} A(x,y)^2 \sum_{x,y} B(x,y)^2}} \quad (8)$$

K 在 $0 \sim 1$ 间取值, 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 值所对应的待验生长点判定为目标果柄的实际生长点, 而沿着实际果柄生长点向上约 10 像素的位置定义为目标草莓的采摘点。

目标瞄准程序模块根据摄像头反馈信息调节电动机 1 和电动机 2, 使得控制末端执行器机械爪开口处与目标草莓的采摘点对正, 为后续的目标接近和采摘做准备; 目标接近程序模块执行过程中同步运行 2 个线程, 一个线程负责控制电动机 3 转动, 使末端执行器在 Z 方向上不断接近目标采摘点; 另一个线程实时检测光纤传感器的信号状态, 当果柄进

入两爪钳之间时, 该程序模块将立即停止末端执行器的前进, 并等待后续程序模块的执行; 采摘收纳程序模块负责控制末端执行器剪切、夹持目标果柄, 并将果实放入果篮托盘上的收纳容器中。

2 试验

2012 年 2 月 22 日, 在北京市昌平区草莓博览园的温室内对高架草莓采摘机器人的性能进行了实地试验, 试验品种为“章姬”, 果型为长圆锥形, 试验样机及试验环境如图 11 所示, 试验采用 220 V 小型电动气泵为机器人的机械爪供气。

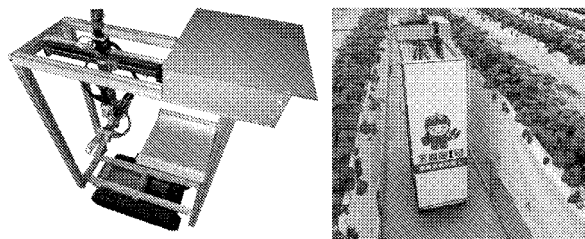


图11 草莓采摘机器人实物及实地试验环境

Fig.11 Photo of strawberry harvesting robot and field test environment

共进行两组试验, 为便于统计和比较, 每组试验中机器人的作业距离均为 4.8 m (12 个工位长度), 过道两侧均随机安排 40 颗草莓, 其中含完全成熟草莓 30 颗 (多余草莓藏入栽培床顶部的栽培槽内)。

第 1 组试验进行时间为 15:30 左右, 栽培床侧表面附近日光照射度约为 4 500 lx; 第 2 组试验开始时间为 17:00 左右, 栽培床附近日光照射度约 1 200 lx。试验结果如表 1 所示。

表1 机器人采摘成功率统计

Tab.1 Statistics of successful rate of picking robot

序号	识别数	无损伤采摘数	作业时间/s	无损伤采摘成功率/%	无损伤采摘总成功率/%
第1组	30	27	564.046	90	88
第2组	30	26	548.367	86	

表 1 结果显示在环境日光照射度为 4 500 lx 和 1 200 lx 时, 机器人工作性能基本相同, 平均无损伤采摘成功率可达 88%。由于高架栽培模式下叶子对草莓的遮挡轻微, 且“章姬”草莓果型一致性较好, 畸形果少, 所有成熟草莓都能被机器人准确识别, 两组采摘失误总数为 7 颗, 均发生在目标接近和夹持过程中, 具体原因如表 2 所示。

针对表 2 统计出的采摘失误原因, 机器人在采摘成功率方面的改进方向主要有 3 个: ①减小末端执行器夹持机构尺寸的同时, 提高目标采摘点的定位精度 (有助于克服果柄过短带来的采摘困难)。

②机构上加装果叶分离装置或改进末端执行器接近目标的路径规划方法(有助于减少叶子对采摘带来的干扰)。

③进一步改进图像处理算法(有助于克服畸形果带来的计算困难)。

表2 机器人采摘失误原因统计

Tab.2 Statistics of failure causes of picking robot

总失误数	失误类型	失误数量	失误原因
7	剪切夹持目标失败	4	果实生长位置距离高架顶端过近,可供夹持的果柄过短,无法成功夹持
	接近目标过程异常	2	果柄附近的草莓叶子干扰末端执行器上的光纤传感器,导致末端执行器接近目标过程中机械爪提前闭合
	瞄准目标失误	1	畸形果,导致果柄位置计算误差过大

试验过程中采用便携式计算机实时监测机器人控制软件的运行状况,根据所生成的日志信息对机器人各类动作的执行时间进行统计,如表3所示。

表3 机器人作业过程中各类动作执行时间统计表

Tab.3 Statistics of execution time of robot operating in work procedure

动作	执行时间/s			占比比例/%
	第1组	第2组	平均	
机器视觉系统图像处理	53.425	46.948	50.187	9.02
目标瞄准过程机构运动	115.307	108.525	111.916	20.12
目标接近及果实收纳	156.752	148.453	152.603	27.44
行走机构动作和末端执行器返程动作	204.722	211.826	208.274	37.44
其他任务	33.840	32.615	33.228	5.97

由表3统计结果可知,该机器人每组作业平均执行总时间为556.208 s,平均每颗草莓采摘时间18.54 s。其中“其他任务”主要包含机器人与监控计算机的通信,在机器人独立工作中基本可以省去;行走机构动作和末端执行器返程动作(主要包括精密运动定位机构初始化和末端执行器移回采摘准备位),由于对运动精度和动态性能要求较低,在不引起机器人大幅度震动的情况下可进一步提高速度,并可通过协调动作时序的方法使多个动作同步进行以缩短整体执行时间,所以此部分速度提升空间较大;目标接近及果实收纳时间可通过改进机械结构的方法进一步缩短,如增加专门机构使果篮能够同步跟随末端执行器移动等方法;目标瞄准过程的速度提升需从运动控制算法和图像处理方法的两个方面进行改进,以保障在末端执行器可靠动作的同时进一步缩短执行时间,相关研究的内容基础性较强。

3 结束语

设计了温室内高架栽培模式下的草莓采摘机器人软、硬件系统,制造了机器人样机,并通过实地试验分析了机器人的性能和改进方向。试验数据表明该机器人能够适应日光照度在1 200~4 500 lx之间的温室环境,可沿高架栽培床的过道往返行走,自主识别并以剪切夹持果柄的方式摘取过道两侧高架栽培床侧表面的成熟草莓,并将摘到的草莓放入自带的收纳容器中,整个过程不损伤果实,采摘成功率可达88%,单颗草莓的采摘时间18.54 s;通过试验分析可知,该机器人通过对机构、运动控制算法、图像处理算法等方面的改进,还可进一步提高采摘成功率和采摘速度。

参 考 文 献

- Cui Y, Nagata M, Guo F, et al. Study on strawberry harvesting robot using machine vision for strawberry grown on annual hill top (part 2) [J]. Journal of Japanese Society of Agricultural Machinery, 2007, 69(2): 60~68.
- Kondo N, Monta M, Arima S. Strawberry harvesting robot on hydroponic system [C] // 3rd IFAC/CIGR Workshop on Artificial Intelligence in Agriculture Makuhari. Chiba, Japan: IFAC, 1998: 24~26.
- Kondo N, Fujiura T, Ting K C, et al. Robots in bioproduction within controlled environments [C] // Robotics for Bioproduction Systems, MI, USA: ASAE, 1998: 173~229.
- Kondo N, Hisaeda K, Monta M. Development of strawberry harvesting robot hand [C] // 1998 ASAE Annual International Meeting Technical Papers. MI, USA: ASAE, 1998: No. 983117.
- Kondo N, Monta M. Strawberry harvesting robots [C] // 1999 ASAE Annual International Meeting Technical Papers. MI, USA: ASAE, 1999: No. 993071.
- Masateru Nagata, Yongjie Cui, Jasper G, et al. Study on cartesian-type harvesting robot for strawberry [C] // Bio-Robotics III Preprints of 3rd IFAC International Workshop on Bio-Robotics, Sapporo, Japan: IFAC, 2006: 266~270.
- Tarrio P, Bernardos A M, Jose R, et al. A harvesting robot for small fruit in bunches based on 3-D stereoscopic vision [C] // Computers in Agriculture and Natural Resources, 4th World Congress Conference. FL, USA: IEEE, 2006: 24~26.
- Guo Feng, Cao Qixin, Masateru, et al. Fruit detachment and classification method for strawberry harvesting robot [J].

- International Journal of Advanced Robotic Systems, 2008, 5(1):41~48.
- 9 张凯良,杨丽,张铁中. 基于激光辅助定位的草莓采摘点机器视觉定位方法[J]. 农业机械学报,2010,41(4):166~171.
Zhang Kailiang, Yang Li, Zhang Tiezhong. An object locating method of laser-assisted machine vision for strawberry harvesting[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(4):166~171. (in Chinese)
 - 10 张凯良,杨丽,张铁中. 草莓收获机器人采摘执行机构设计与试验[J]. 农业机械学报,2011,42(9):155~161.
Zhang Kailiang, Yang Li, Zhang Tiezhong. Design and experiment of picking mechanism for strawberry harvesting robot [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(9):155~161. (in Chinese)
 - 11 Shigehiko Hayashi, Kenta Shigematsu, Satoshi Yamamoto, et al. Evaluation of a strawberry-harvesting robot in a field test [J]. Biosystems Engineering, 2010, 105(2):160~171.
 - 12 Yamamoto Satoshi, Hayashi Shigehiko, Saito Sadafumi, et al. Development of robotic strawberry harvester to approach target fruit from hanging bench side [C]//3rd IFAC International Conference Agricontrol, Japan: IFAC, 2010, ISSN: 14746670, ISBN-13:9783902661906.
 - 13 Rajendra Peter, Kondo Naoshi, Ninomiya Kazunori, et al. Machine vision algorithm for robots to harvest strawberries in tabletop culture greenhouses [J]. Engineering in Agriculture, Environment and Food, 2009, 2(1):24~30.
 - 14 Masateru Nagata, Qixin Cao. Study on grade judgment of fruit vegetables using machine vision [J]. Japan Agricultural Research Quarterly, 1998,32(4):257~265.

~~~~~

(上接第 130 页)

- 9 戴宏民. 中国包装机械的发展战略研究[J]. 包装工程, 2003,24(3):5~9.  
Dai Hongmin. Study of China's development strategies of package mechanism [J]. Packaging Engineering, 2003,24(3):5~9. (in Chinese)
- 10 龚伟,周志宏,文字. 智能化防伪包装技术综述[J]. 物流技术, 2008,27(6):84~86.  
Gong Wei, Zhou Zhihong, Wen Zi. Summary on intelligent sham-proof package technology [J]. Logistics Technology, 2008, 27(6):84~86. (in Chinese)
- 11 Ribo O, Korn C, Meloni C. IEDA: a large-scale project on electronic identification of livestock [J]. Scientific and Technical Review, 2001,20(2):426~436.
- 12 Jeremy L. The history of RFID [J]. IEEE Transactions on Potentials, 2005, 24(4):8~11.
- 13 Roy W. An introduction to RFID technology [J]. IEEE Transactions on Pervasive Computing, 2006, 5(1):25~33.
- 14 张春霞,彭东华,张洪杰. RFID 在国内外农产品物流中的应用对比分析[J]. 中国商贸, 2010(25):151~152.
- 15 易绍祥. 白酒防伪芯片的研究及其自动包装系统的设计[J]. 自动化应用, 2011(6):14~15.  
Yi Shaoxiang. Research on liquor forgery-proof chip and design of automatic packaging system [J]. Automation Application, 2011(6):14~15. (in Chinese)
- 16 肖凡. RFID 技术在药品防伪包装中的应用研究[J]. 湖南包装, 2010(3):25~26.
- 17 陈歆,沈玲莉. 水果黄瓜自动包装机的设计研究[J]. 农机化研究, 2010,32(1):140~142.  
Chen Xin, Shen Lingli. Design of automatic packing machine of cucumber [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2010,32(1):140~142. (in Chinese)
- 18 杨福馨,李严. 一线与二线防伪包装技术研究[J]. 包装世界, 2001(6):74~77.
- 19 张连文,杨传民,王勇,等. 樱桃番茄运输包装件振动冲击性能试验[J]. 农业机械学报, 2011,42(3):125~130, 155.  
Zhang Lianwen, Yang Chuanmin, Wang Yong, et al. Vibration and impact performance tests of cherry tomato transport packages [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(3):125~130, 155. (in Chinese)