DOI: 10. 13718/j. cnki. xdzk. 2022. 08. 023

基于云台相机的番茄主茎跟踪控制方法

张万豪^{1,2}, 张文爱¹, 冯青春^{2,3}, 成伟^{1,2}, 王博文²

1. 太原理工大学 信息与计算机学院,山西 晋中 030600;

2. 北京农业智能装备技术研究中心,北京100097;3. 国家农业智能装备工程技术研究中心,北京100097

摘要:为满足番茄整枝和果实收获机器人的需求,设计了一种对番茄主茎主动跟踪的视觉获取系统,提出了一种 云台姿态的控制方法.该系统由一个二自由度的云台和 Realsense D435i深度相机组成,由安装在云台上的相机获 取番茄主茎的三维信息,根据提出的跟踪方案确定跟踪参考点的 3D 坐标;在完成云台和相机参数标定的基础上, 提出了基于主茎图像形态的主动跟踪控制方法,通过实时控制相机姿态实现对番茄主茎自下而上进行图像的跟踪 采集.试验结果表明,观测垂直区域在 600~1 500 mm 的范围且跟踪步长 Δ1≤150 mm 时,跟踪的最大水平偏差和 最大垂直偏差不超过 8 个像素,水平像素最大偏差相当于番茄主茎像素宽度的 53.3%.该研究可以为番茄授粉、 整枝、喷药和采摘等环节的智能化作业提供技术支持. 芙 键 词:农业机器人;视觉伺服;番茄主茎

中图分类号: TP242.6; S641.2 文献标志码: A 文章编号: 1673-9868(2022)08-0216-10



开放科学(资源服务)标识码(OSID):

Tomato Main-stem Tracking Control Method Based on PTZ Camera

ZHANG Wanhao^{1,2}, ZHANG Wenai¹, FENG Qingchun^{2,3}, CHENG Wei^{1,2}, WANG Bowen²

1. College of Information and Computer, Taiyuan University of Technology, Jinzhong Shanxi 030600, China;

2. Beijing Research Center of Intelligent Equipment for Agriculture, Beijing 100097, China;

3. National Research Center of Intelligent Equipment for Agriculture, Beijing 100097, China

Abstract: A visual information acquisition system for active tracking of tomato main-stem was designed to meet the needs of tomato pruning and harvesting robots, and a tracking control method of the PTZ was proposed. The system consists of a 2-DOF PTZ and Realsense D435i depth camera. The 3D information of the tomato main-stem is acquired by the camera installed on the PTZ. On the basis of completing the calibration of PTZ and camera parameters, a proactive tracking control method based on the image morphology of the tomato main-stem is proposed. The tracking and acquisition of the image of the tomato main-stem is achieved by real-time control of camera posture. The test results showed that the maximum verti-

收稿日期: 2021-06-11

基金项目:国家重点研发计划项目(2019YFE0125200);北京市农林科学院创新能力建设专项(KJCX20210414);2021年度农业智能装 备技术北京市重点实验室建设(PT2021-15).

作者简介:张万豪,硕士研究生,主要从事智能控制与信息处理方向的研究.

通信作者:张文爱,副教授.

cal deviation of the maximum horizontal deviation did not exceed 8 pixels, and the maximum deviation of the horizontal pixel was equivalent to 53.3% of the width of the tomato main-stem pixel when the vertical region was in the range of 600-1 500 mm and the tracking step Δl was not more than 150 mm. The results of this study can provide technical support for the intelligent operation of tomato pollination, pruning, spraying and harvesting.

Key words: agricultural robot; visual servoing; Tomato main-stem

中国是世界上番茄栽培面积最大、生产总量最多的国家,常年产量在 5 000 t 以上,并呈现增长趋势^[1].目前,番茄已经成为我国种植面积和产量最大的蔬菜品种之一,2020 年番茄产量为 6 515 万 t,占全国蔬菜总产量的 7.1%^[2].在番茄种植周期中,整枝打叶、授粉、采摘以及喷药等环节人工作业频次高、劳动强度大.近年来,随着从业劳动力的流失,番茄种植管理的人工费用已达到总生产成本的 35%以上,成为制约番茄种植产业效益增长的重要因素^[3].因此,研发替代或者辅助人工作业的番茄机器人,对于我国番茄安全供应、种植产业健康发展具有重要意义.

由于种植管理作业对象(果、叶、花)都是交错生长在番茄主茎上^[4],这类作业有着相似的作业路径, 都是沿着番茄主茎的生长方向进行作业.因此对番茄植株主茎视觉信息的获取是实现对番茄智能化管理作 业的重要前提,针对这类作业环节,借鉴人工作业方式,沿着番茄主茎生长方向自下而上主动搜索作业目 标,是提高对作业对象定位效率和识别精度的有效方法.

国内外学者针对果蔬的茎秆形态跟踪定位问题做了很多研究.Botterill 等^[5]设计的葡萄藤修剪机器人 采用3个围绕葡萄藤固定安装在箱体内部的立体相机获取葡萄藤的视觉信息以实现修剪工作.黄彪^[6]设计 的枇杷剪枝机器人采用2个超广角相机在3个固定高度对枇杷树做3轮扫描获取枇杷枝条的视觉信息,摄 像头的畸变导致采集的图像存在较大失真.Cuevas 等^[7]设计的玫瑰整枝机器人采用立体相机在9个固定位 姿对玫瑰灌木进行扫描获取整株玫瑰的点云图,根据相邻作业点的实时更新实现对整株玫瑰的作业.冯青 春等^[8]提出的离散小视场番茄主茎测量方法,实现了对番茄主茎的测量和信息获取.荷兰 Tomas^[9]团队设 计的 Kompano Deleaf-Line 机器人采用可控的 Chameleon 3 相机实现了对番茄侧枝的修剪.Jon 等^[10]借助 安装于机械手末端的深度相机获取视觉信息设计了一款番茄采摘机器人.Arad 等^[11]设计的甜椒收获机器 人采用随末端移动的深度相机识别目标和果梗.这些研究极大促进了玫瑰、番茄和果树等作物整枝和收获 技术的进步,但这些研究中,以固定视角被动搜索目标的设计方案使得设备的体积过大,得到大量的冗余 信息;以可控视角主动搜索的方式,设备轻巧灵活,获取信息可用性更大,可以提高信息的处理效率.

针对番茄智能化作业需要,本文设计了基于云台相机的番茄主茎形态视觉信息获取系统,提出了对番茄 主茎的视觉跟踪控制方法.根据摄像机视场内的番茄主茎形态,实时调整云台姿态使番茄主茎上的跟踪参考 点始终位于相机视场中心.该研究可以为番茄整枝、授粉、喷药和采摘等智能化作业环节提供技术支撑.

1 温室环境与跟踪原理

1.1 温室番茄栽培环境

温室番茄栽培逐渐趋于工厂化和标准化,这将有利于机器人的智能作业.选择试验的温室栽培环境如图1所示.番茄栽培在离地面 600 mm 高的培养槽中,番茄种植行间距约为1 200 mm,株距为 300 mm.距地面 600~1 500 mm 的区域为番茄整枝、打叶、授粉和收获的作业区域.随着番茄植株的生长,通过释放缠绕于主茎的吊线进行落蔓,使得作业区域相对地面高度保持不变,因此本文以此高度区域内的番茄植株为跟踪的对象.

1.2 主茎跟踪原理

如图 2 所示,果实和侧枝是番茄整枝和采摘环节的作业对象.番茄的侧枝和果实是沿着主茎生长的, 由于作业对象交错生长在番茄主茎两侧,大视场下会出现信息冗余和遮挡,采用离散小视场的方法可以获 取更加精确的信息.借鉴人工作业方式,沿着番茄主茎自下而上地搜索可以提高作业对象(花、果和侧枝) 的探测效率.主动跟踪就是不断调整相机姿态使番茄主茎上变化的跟踪参考点始终位于视场中心进而实现 模仿人工作业时获取视觉信息的一种目标跟踪方法.



图 1 温室番茄栽培环境

2 云台视觉系统设计

2.1 硬件构成

视觉信息是支撑机器人作业的重要依据,为 了避免大视场带来的信息冗余以及对目标定位和 识别精度的影响,采用离散小视场方式采集信息. 本次试验设计的视觉获取系统如图 3 所示.

视觉获取系统主要由一个二自由度的云台和 Intel 公司的 Realsense D435i 深度相机组成. 云台 有左右摆动和上下俯仰两个自由度,其范围分别 为(-75°~+75°)和(-30°~+60°),其精度均为 0.01°. Realsense D435i 相机是一款深度相机,采 用即用型 USB 供电形式,搭载 Intel 公司的 D400 系列深度模块,具备完整的深度光学解决方案. 它 主要由两个红外传感器、一个1080 P 的色彩传感 器和一个红外激光投射器 3 个部分组成^[12]. D435i 模仿人眼的视觉成像原理,通过两个红外传感器 同时追踪由红外激光投射器发出的红外光位置, 然后利用三角定位原理计算得到图像中的深度信 息. 主要参数^[13]如表 1 所示.



图 2 目标生长规律



Realsense D435i相机; ② 俯仰机构;
 ③ 摆动机构; ④ 控制模块与电源.
 图 3 视觉获取系统

表 1	Realsense	D435i	相机参数	

型号	测距范围	彩色图像 最大分辨率	深度图像 最大分辨率	测量精度	物理尺寸
Realsense D435i	0.3~3 m	1 920 * 1 080 90FPS/s	1 280 * 720 30FPS/s	2 m 内误差 小于 2%	90 mm * 25 mm * 25 mm

2.2 结构参数标定

明确云台与相机的结构位置关系是根据图像信息控制云台姿态的重要依据^[14].通过 D435i 相机可以直接得到目标点在相机坐标系下的坐标,但为了实现对目标的跟踪和云台的控制,必须将其坐标转换到云台坐标系下.如图 3 所示,云台坐标系为 $O_T - X_T Y_T Z_T$,相机坐标系为 $O_C - X_C Y_C Z_C$,则云台坐标与相机坐标存在式(1)的转换关系^[15].

$$\begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{R} & t \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_T \\ Y_T \\ Z_T \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{T} \begin{bmatrix} X_T \\ Y_T \\ Z_T \\ 1 \end{bmatrix}$$
(1)

T为云台与相机坐标系之间的转换矩阵.由式(1)可知,对云台相机做标定就是求解旋转矩阵 R 和平移分量 t.

如图 3 所示,以云台垂直自由度的转轴与云台上平面的交点 O_0 为原点,并以左右摆动转轴向上的方向 作为 Z 轴的正方向,以水平指向目标的方向作为 X 轴正方向,建立基坐标系 $O_0 - X_0 Y_0 Z_0$.以云台两个旋 转轴的交点 O_T 为原点,以俯仰旋转轴为 Y 轴,以与相机光轴平行的方向为 X 轴,建立云台坐标系 $O_T - X_T Y_T Z_T$.以左红外相机的光心为原点 O_c 建立相机坐标系 $O_c - X_c Y_c Z_c$, Z_c 轴与光轴重合.根据坐标系 建立规则,基坐标系 $O_0 - X_0 Y_0 Z_0$ 与云台坐标系 $O_T - X_T Y_T Z_T$ 的原点共线.

已知,坐标系绕 X 轴和 Z 轴旋转具有式(2)的旋转矩阵关系[16].

$$\boldsymbol{R}_{X} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\theta) & -\sin(\theta) \\ 0 & \sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \qquad \boldsymbol{R}_{Z} = \begin{bmatrix} \cos(\gamma) & -\sin(\gamma) & 0 \\ \sin(\gamma) & \cos(\gamma) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$
(2)

 θ , γ 分别是坐标系绕 X 轴和 Z 轴的旋转角度.

规定云台自由度的旋转顺序为先左右摆动后上下俯仰.则基坐标系 $O_0 - X_0 Y_0 Z_0$ 与云台坐标系 $O_T - X_T Y_T Z_T$ 存在转换关系 C_T^0 .

$$C_{T}^{0} = \begin{bmatrix} \mathbf{R}_{Z} & 0\\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & t_{T}^{0}\\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{R}_{X} & 0\\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$
(3)

t^{*n*} 为基坐标系与云台坐标系间的位移关系.

设空间中一点 q 在基坐标系下为 q_0 , 在云台坐标系下为 q_T , 根据坐标系转换原理可得式(4) 的关系.

$$q_0 = \boldsymbol{C}_T^0 q_T \tag{4}$$

设云台坐标系 $O_T - X_T Y_T Z_T$ 相对于基坐标系 $O_0 - X_0 Y_0 Z_0$ 具有一定的初始姿态 θ_0 和 γ_0 . 经过一次姿态 调整后, 点 q 在云台坐标系下为 q_T . 则 q_0, q_T 和 q_T 存在式(5) 的关系.

$$\begin{cases} \boldsymbol{q}_{0} = \boldsymbol{C}_{T(\theta_{0}, \gamma_{0})}^{\circ} \boldsymbol{q}_{T} \\ \boldsymbol{q}_{0} = \boldsymbol{C}_{T(\theta_{0} + \Delta\theta, \gamma_{0} + \Delta\gamma)}^{\circ} \boldsymbol{q}_{T} \end{cases}$$
(5)

 $\Delta \theta$ 和 $\Delta \gamma$ 分别是云台左右摆动和上下俯仰两个自由度的增量.

通过式(5)可以得到在云台坐标系下相邻两个姿态之间的转换关系 $H^{i}_{(i+1)}$.

$$q_{T} = (\boldsymbol{C}_{T(\theta_{0}, \gamma_{0})}^{0})^{-1} \boldsymbol{C}_{T(\theta_{0} + \Delta\theta, \gamma_{0} + \Delta\gamma)}^{0} q_{T}^{'} = \boldsymbol{H}_{(i+1)}^{i} q_{T}^{'}$$
(6)

在标定转换矩阵 T 时,通过连续两次设置云台姿态角的增量 θ_1 、 γ_1 和 θ_2 、 γ_2 得到3个连续的云台姿态,相 机分别从这3个不同的视角拍摄固定位置的靶标棋盘. 靶标平面上一固定点 P 在相机坐标系 $O_c - X_c Y_c Z_c$ 和云台坐标系 $O_T - X_T Y_T Z_T$ 中分别表示为 $P_{c,i}$ 和 $P_{T,i}$.根据获得的D435i相机的内参,可以求得靶标平面与相机姿态转换关系 I_i ,则相邻姿态 i和(i + 1)下点 P 在相机坐标系下的坐标 $P_{c,i}$ 和 $P_{c,i+1}$ 存在关系 $I_i P_{c,i} = I_{i+1} P_{c,i+1}$.由此可得相机坐标系在相邻姿态下的转换关系 $A_{(i+1)}^i = (I_i)^{-1} I_{i+1}$.云台坐标系中相邻姿态的转换关系 $H_{(i+1)}^i$ 可由式(6)得到 $H_{(i+1)}^i = (C_{T(\theta_0, \gamma_0)}^0)^{-1} C_{T(\theta_0+\Delta\theta, \gamma_0+\Delta\gamma)}^0$.于是 $P_{c,i}$, $P_{c,i+1}$ 和 $P_{T,i}$, $P_{T,i+1}$ 存在式(7)的关系.

$$\begin{cases}
P_{C,i} = \mathbf{A}_{(i+1)}^{i} P_{C,i+1} \\
P_{T,i} = \mathbf{H}_{(i+1)}^{i} P_{T,i+1} \\
P_{C,i} = \mathbf{T}_{T,i} \\
P_{C,i+1} = \mathbf{T}_{T,i+1}
\end{cases}$$
(7)

对式(7) 化简处理可得 $TH_{(i+1)}^{i} = A_{(i+1)}^{i}T$,将相邻 3 个姿态的参数分别带入矩阵 $A_{(i+1)}^{i}$ 和 $H_{(i+1)}^{i}$ 中可得:

$$\begin{cases}
\mathbf{T}\mathbf{H}_{2}^{2} = \mathbf{A}_{2}^{2}\mathbf{T} \\
\mathbf{T}\mathbf{H}_{3}^{2} = \mathbf{A}_{3}^{2}\mathbf{T}
\end{cases}$$
(8)

采用 Tsai 两步法^[17] 求解式(8);已知矩阵 *A* 和 *H* 的旋转轴和旋转角可以求出转换矩阵 *T* 的旋转矩阵 *R*,再将 *R* 代入式(8)则可求出平移分量 *t*,最后求得相机坐标系与云台坐标系的转换矩阵 *T*.

3 主茎跟踪控制算法

3.1 跟踪参考点坐标转化

根据番茄主茎生长趋势实时调整云台姿态使番茄主茎上的跟踪参考点始终位于视场中心,是实现对番

茄主茎主动跟踪的基本思路.如何确定跟踪参考点 B_{c,i}和跟踪点的期望位置B_{c,i+1} 是实现对番茄主茎主动 跟踪的关键.在番茄工厂化种植中,番茄主茎都做了吊绳落蔓处理,根据实地考察后发现,这些番茄植株 除在根部有较大弯曲外,主茎其他部分生长趋势比较规则,在较小视场下可近似为一条空间曲线.依据这 些,提出了跟踪参考点 B_{c,i}和跟踪点期望位置B_{c,i+1}的确定方法.

番茄主茎的跟踪方案如图 4 所示.为了避免视场边缘空洞对相机获取深度信息的影响,在当前视场下 选取位于视场中番茄主茎上的一点 $A_{c,i}$ 作为跟踪起始点,其坐标为 $A_{c,i}(x_{c,i}, y_{c,i}, z_{c,i})$,过点 $A_{c,i}$ 拟合得 到番茄主茎该段空间直线 L 的方程.让点 $A_{c,i}$ 沿着直线 L 方向向量移动距离 $\Delta l(\Delta l \ge 0)$ 到达点 $B_{c,i}$,则 将点 $B_{c,i}$ 确定为跟踪参考点,其坐标为 $B_{c,i}(x'_{c,i}, y'_{c,i}, z'_{c,i})$,示意图如图 4 中(*a*) 图所示.跟踪目的是调 整云台位姿后使跟踪参考点 $B_{c,i}$ 位于下一个视场的中心位置,即视场(*i*+1)中的点 $B_{c,i+1}$,则点 $B_{c,i+1}$ 的 坐标为 $B_{c,i+1}(0, 0, z_{c,i+1})$;借助于深度相机可以得到番茄主茎上所有点的三维信息,故可以求得直线L 的 空间方程.将跟踪步长 Δl 代入到直线L 的方程中可以求得跟踪参考点 $B_{c,i}$ 在相机坐标系中的三维坐标.

$$\begin{cases} x'_{c,i} = x_{c,i} + m\Delta l \\ y'_{c,i} = y_{c,i} + n\Delta l \\ z'_{c,i} = z_{c,i} + p\Delta l \end{cases}$$
(9)

式中,向量l(m, n, p)为直线L的单位方向向量.

根据图 4 可以看出, 跟踪参考点 $B_{c,i}(x'_{c,i}, y'_{c,i}, z'_{c,i})$ 和期望点 $B_{c,i+1}(0, 0, z_{c,i+1})$ 描述的是空间中的 同一个点;同时,相机坐标系的坐标原点 O_c 的空间位置基本不变,所以有 $|O_c B_{c,i}| = |O_c B_{c,i+1}|$ 成立. 将 跟踪参考点 $B_{c,i}$ 和期望点 $B_{c,i+1}$ 的坐标代入可以求得期望点 $B_{c,i+1}$ 的 z 坐标.

$$z_{c,i+1} = \sqrt{x_{c,i}^2 + y_{c,i}^2 + z_{c,i}^2 + 2\Delta l (mx_{c,i} + ny_{c,i} + pz_{c,i}) + \Delta l^2}$$
(10)
根据式(10) 可以求得期望点 $B_{C,i+1}(0, 0, z_{c,i+1})$ 在相机坐标系下的三维坐标.

根据图 4 的跟踪方案,已经确定了跟踪参考点 $B_{c,i}$ 和期望点 $B_{c,i+1}$ 在相机坐标系下的空间坐标.



图 4 番茄主茎主动跟踪原理

3.2 云台姿态伺服控制

云台姿态的伺服控制^[18]依赖于跟踪参考点 $B_{c,i}$ 和期望位置 $B_{c,i+1}$ 在云台坐标系中的坐标信息.将相机 坐标系下跟踪参考点 $B_{c,i}(x'_{c,i}, y'_{c,i}, z'_{c,i})$ 和期望位置点 $B_{c,i+1}(0, 0, z_{c,i+1})$ 的坐标值分别代入到式(7)可 以求得其在云台坐标系中的坐标 $B_{T,i}$ 和 $B_{T,i+1}$.

$$B_{T,i} = \mathbf{T}^{-1} B_{C,i}$$

$$B_{T,i} = \mathbf{T}^{-1} B_{C,i}$$
(11)

将式(11)求得的云台坐标点代入到式(6)并作齐次化处理可得:

$$B_{T,i} = \boldsymbol{H}_{(i+1)}^{i} B_{T,i+1} \tag{12}$$

将参考点 B_{T,i} 和 B_{T,i+1} 的坐标代入到式(12) 并化简可得:

$$\begin{cases} x_{T,i+1}c(\Delta\gamma) - y_{T,i+1}c(\theta + \Delta\theta)s(\Delta\gamma) + z_{T,i+1}s(\theta + \Delta\theta)s(\Delta\gamma) = x_{T,i} \\ x_{T,i+1}c(\theta)s(\Delta\gamma) + y_{T,i+1}[s(\theta + \Delta\theta)s(\theta) + c(\theta + \Delta\theta)c(\theta)c(\Delta\gamma)] + \\ z_{T,i+1}[c(\theta + \Delta\theta)s(\theta) - s(\theta + \Delta\theta)c(\theta)c(\Delta\gamma)] = y_{T,i} \\ - x_{T,i+1}s(\theta)s(\Delta\gamma) + y_{T,i+1}[s(\theta + \Delta\theta)c(\theta) - c(\theta + \Delta\theta)s(\theta)c(\Delta\gamma)] + \\ z_{T,i+1}[c(\theta + \Delta\theta)c(\theta) + s(\theta + \Delta\theta)s(\theta)c(\Delta\gamma)] = z_{T,i} \end{cases}$$
(13)

其中 c 代表 cos 函数, s 代表 sin 函数.

方程(13) 中包含的未知数 $\Delta \theta$, $\Delta \gamma$ 是云台依次绕 X 轴和 Z 轴旋转的角度增量. 解得:

$$\begin{cases} m = y_{T,i}\cos(\theta) - z_{T,i}\sin(\theta) \\ \Delta \gamma = \arcsin\left(\frac{x_{T,i+1}}{\sqrt{m^2 + x_{T,i}^2}}\right) - \arctan\left(\frac{x_{T,i}}{m}\right) \\ n = y_{T,i}\sin(\theta) + z_{T,i}\cos(\theta) \\ \Delta \theta = \arcsin\left(\frac{n}{\sqrt{y_{T,i+1}^2 + z_{T,i+1}^2}}\right) - \arctan\left(\frac{z_{T,i+1}}{y_{T,i+1}}\right) - \theta \end{cases}$$
(14)

 θ 是每一次位姿变换前云台坐标系 $O_T - X_T Y_T Z_T$ 相对于基坐标系 $O_0 - X_0 Y_0 Z_0$ 的上下俯仰角度,可以通过 云台驱动电机编码器实时反馈得到.

4 试验与结果分析

4.1 现场试验

为了验证对番茄主茎主动跟踪算法的实际效果,在北京大兴区宏福国际农业生产基 地番茄工厂化温室内开展了现场试验.选择 5株番茄植株,分别在跟踪步长 Δ*l* 为 50 mm,100 mm,150 mm和200 mm下完成 一次跟踪试验.将安装有相机的云台固定在 与番茄植株种植槽等高的可移动工作台上, 云台与试验对象的水平距离为400~ 600 mm,跟踪的番茄主茎区域为离地600~ 1500 mm高度范围内.根据相机视场大小



图 5 人工选取主茎跟踪起始点

和试验对象的高度,需要调整云台姿态 4~5次以完成对单株番茄主茎的跟踪.为了避免引入主茎识别误差, 本文以人眼对摄像机视场主茎的实时识别结果为依据,在主茎中心线上选择跟踪起始点.基于 python 3 开发 了云台相机的跟踪交互程序,将相机的视频流实时显示在界面上,如图 5 所示,人工通过鼠标在靠近视场 中心的番茄主茎上选择一个点 A_{c,i} 作为跟踪起始点,沿着主茎的中心线在视场上边缘主茎上再次选取一 个点 A_{c,i+1}. 由深度相机可得点 A_{c,i},A_{c,i+1} 空间坐标,以两点连线 A_{c,i}A_{c,i+1} 的立体单位向量作为当前视 场主茎的单位方向向量 *l*. 设定跟踪步长 Δ*l* 下,根据式(9)可以求得跟踪参考点 B_{c,i} 在当前视场下的坐标. 求解云台转角位移,调整云台相机的姿态后,比较相机的视场中心点与跟踪期望点的像素偏差.

4.2 结果分析

试验得到的结果包括每个姿态下观测到的番茄植株离散图和参考点与当前视场中心点像素差的绝

对值. 以云台姿态调整后参考点与视场中心点像素差的绝对值 V_i⁽ⁱ⁺¹⁾ 评价跟踪算法对番茄主茎的跟踪效果. 跟踪偏差 V_i⁽ⁱ⁺¹⁾ 包含水平像素偏差 u_i⁽ⁱ⁺¹⁾ 和垂直像素偏差 v_i⁽ⁱ⁺¹⁾. 同时,为了验证算法是否适用于对番茄主茎的跟踪,引入番茄主茎的像素宽度,通过水平像素偏差占番茄主茎像素宽度的大小验证算法的适用性.

$$D = \frac{\Lambda \Psi \hat{h} \hat{k}}{\frac{\pi}{m} \pm \hat{z} \hat{k} \hat{k} \hat{z} \hat{k} \hat{c}} = \frac{u_i^{(i+1)}}{D_0}$$
(15)

式(15)中, D₀为番茄主茎的像素宽度, 根据试验环境测得番茄主茎像素宽度平均为 15 个像素.

跟踪结果如图 6 所示,是同一植株在相同姿态下不同跟踪步长的跟踪结果.当跟踪步长 Δ*l* = 200 mm 时,跟踪参考点不在当前视场,为了直观体现误差,试验中可人为标记.



 $\Delta l = 50 \text{ mm}$





 $\Delta l = 150 \text{ mm}$

 $\Delta l = 200 \text{ mm}$

视场中心点
 跟踪起始点
 跟踪参考点
 图6
 同一姿态下不同步长跟踪结果

对番茄植株相邻视场主茎标记点跟踪偏差 $V_i^{(z+1)}$ 的记录如表 2 所示. 在不同的跟踪步长下分别得到了 5 组跟踪偏差数据. 分析表 2 可知,当跟踪步长 $\Delta l = 50 \text{ mm}$ 时,跟踪的最大水平偏差为 6 个像素,最大垂 直偏差为 5 个像素,最大水平偏差占主茎像素宽度的 40%;当跟踪步长 $\Delta l = 100 \text{ mm}$ 时,跟踪的最大水平 偏差为 7 个像素,最大垂直偏差为 6 个像素,最大水平偏差占主茎像素宽度的 46.7%;当跟踪步长 $\Delta l = 150 \text{ mm}$ 时,跟踪的最大水平偏差为 8 个像素,最大垂直偏差为 7 个像素,最大水平偏差占主茎像素宽度的 53.3%;当跟踪步长 $\Delta l = 200 \text{ mm}$ 时,跟踪的最大水平偏差为 13 个像素,最大垂直偏差为 10 个像素,最大 水平偏差占主茎像素宽度的 86.7%.

明陀止匕	始日	V_1^2		V	V_2^3		V_3^4		${oldsymbol V}_4^5$	
岷际少下	姍丂	u_{1}^{2}	v_1^2	u_{2}^{3}	v_2^3	u_{3}^{4}	v_3^4	u_{4}^{5}	v_4^5	
$\Delta l = 50 \text{ mm}$	1	1	0	2	1	3	2	5	4	
	2	1	1	2	2	3	2	6	3	
	3	0	0	2	1	2	2	4	4	
	4	2	1	2	2	3	2	5	4	
	5	1	2	2	1	4	2	6	5	
1~5 组平均偏差(pixel)		1	0.8	2	1.4	3	2	5.2	4	
$\Delta l = 100 \text{ mm}$	6	2	1	4	1	4	2	5	4	
	7	3	2	3	2	5	3	6	4	
	8	1	1	2	2	2	3	4	5	
	9	3	2	3	2	4	3	6	6	
	10	2	2	3	3	5	3	7	5	
6~10 组平均偏差(pixel)		2.2	1.6	3	2	4	2.8	5.6	4.8	
$\Delta l = 150 \text{ mm}$	11	3	2	3	3	4	3	5	4	
	12	3	3	3	3	4	4	6	5	
	13	2	3	3	3	4	3	5	5	
	14	4	2	4	5	5	4	6	7	
	15	3	2	4	3	6	4	8	6	
11~15 组平均偏差(pixel)		3	2.4	3.4	3.4	4.6	3.6	6	5.4	
$\Delta l = 200 \text{ mm}$	16	4	3	4	5	8	5	9	7	
	17	5	4	5	4	7	7	12	8	
	18	4	4	5	4	7	7	10	6	
	19	5	5	4	6	9	5	12	9	
	20	6	5	6	5	9	6	13	10	
16~20 组平均偏差(pixel)		4.8	4.2	4.8	4.8	8	6	11.2	8	
总体平均偏差(pixel)		2.75	2.25	3.3	2.9	4.9	3.6	7	5.55	
水平像素偏差 主茎像宽		0.	183	0.	22	0.3	327	0.	467	

表 2 跟踪偏差 V_i⁽ⁱ⁺¹⁾

图 7 和图 8 分别是不同跟踪步长下平均水平偏差和平均垂直偏差.观察每组跟踪步长下的跟踪偏差, 随着云台姿态调整次数的增加,跟踪的平均偏差也在变大,这是由于随着跟踪的进行,跟踪对象与云台相 机的距离在变大,相机的畸变变大,导致相机测距产生偏差.比较同一次云台姿态调整后的跟踪偏差可以 发现,随着跟踪步长的增加,同等姿态下跟踪偏差也在变大,因为随着跟踪步长的变大,对拟合的主茎直线L的准确率要求增加.但是番茄主茎客观上不是一条规则的空间直线,随着跟踪步长的增加,依赖于拟合直线确定的跟踪参考点误差增大,导致跟踪的偏差也会变大.比较每一组数据的跟踪偏差变化曲线可以发现在云台姿态第4次调整后,跟踪偏差较前3次有明显的增加,这是由于第4次姿态调整后,跟踪距离变化较大,相机畸变变大,导致跟踪效果变差.



图 9 是同一株番茄植株在不同跟踪步长下的跟踪偏差,在跟踪步长为 50 mm,100 mm,150 mm 时, 跟踪偏差增加幅度较小,但在跟踪步长为 200 mm 时,跟踪偏差增加幅度较大.说明跟踪步长在不超过 150 mm 时可以保证跟踪精度,当跟踪步长达到或超过 200 mm 时,跟踪效果变差,精度下降严重.

图 10 是不同跟踪步长下,水平平均偏差占番茄主茎像素宽度的多少,20 组数据的最大水平平均偏差 占主茎像宽的 46.7%. 在跟踪步长为 150 mm 时,最大水平平均偏差占主茎像宽的 40%;在跟踪步长为 200 mm 时,最大水平平均偏差占主茎像宽的 74.7%,远高于平均水平;说明当跟踪步长 Δl 超过 200 mm 时该算法不适合跟踪番茄主茎.可以发现当跟踪步长越小时,跟踪的精度就越高,但是跟踪的效率也会降 低,综合考虑将跟踪步长 Δl 设置为 100 mm 到 150 mm 之间最为合适.



5 结论

为了提高对番茄智能管理作业对象的探测效率,本研究提出了一种基于云台相机的番茄主茎主动跟踪 控制方法.采用二自由度云台相机,实现了对主茎水平和垂直方向的跟踪;通过视觉系统结构参数标定, 建立了云台与摄像机坐标之间的关系;提出了以主茎形态为引导的主茎跟踪控制方法,实现了摄像机视场 中心对主茎的定向跟踪.试验结果表明,在番茄植株离地 600~1 500 mm 高度范围内,当跟踪步长 Δ*l* 150 mm 时,平均水平偏差和平均垂直偏差不超过 6 个像素,水平偏差占番茄主茎像宽不超过 40%;当跟 踪步长 Δ*l* ≥200 mm 时,跟踪偏差变大,水平偏差占番茄主茎像宽超过 70%.综合考虑跟踪精度和跟踪效 率,将跟踪步长设置为 100~150 mm 可以满足对番茄主茎的跟踪.本研究可以为番茄的收获、打叶和授粉 提供视觉信息参考.

参考文献:

- [1] 熊露,朱孟帅. 番茄 2016 年市场分析及 2017 年市场预测 [EB/OL]. 农业部市场与经济信息司,(2017-01-22)[2021-05-28]. http://www.moa.gov.cn/gk/jcyj/201701/t20170122_5461550.htm.
- [2] 王海楠, 弋景刚, 张秀花. 番茄采摘机器人识别与定位技术研究进展 [J]. 中国农机化学报, 2020, 41(5): 188-196.
- [3] 成伟,张文爱,冯青春,等. 基于改进 YOLOv3 的温室番茄果实识别估产方法 [J]. 中国农机化学报,2021,42(4): 176-182.
- [4] 穆月英.北京市蔬菜产业经济研究 [M].北京:中国农业出版社, 2013.
- [5] BOTTERILL T, PAULIN S, GREEN R, et al. A Robot System for Pruning Grape Vines [J]. Journal of Field Robotics, 2017, 34(6): 1100-1122.
- [6] 黄彪. 枇杷剪枝机器人关键技术的研究 [D]. 广州: 华南理工大学, 2016.
- [7] CUEVAS-VELASQUEZ H, GALLEGO A J, TYLECEK R, et al. Real-Time Stereo Visual Servoing for Rose Pruning with Robotic Arm [C] //2020 IEEE International Conference on Robotics and Automation. May 31 - August 31, 2020, Paris, France. IEEE, 2020: 7050-7056.
- [8] 冯青春, 王秀, 刘继展, 等. 基于视觉伺服的温室番茄植株主茎跟踪与测量方法 [J]. 农业机械学报, 2020, 51(11): 221-228.
- [9] TOMAS D B. 配备 Chameleon3 相机的机器人,被用来修剪西红柿的枯叶 [EB/OL]. 机器视觉, (2022-06-07) [2020-08-06]. http://www.iianews.com/ca/_01-ABC0000000000298184.shtml.
- [10] JUN J, KIM J, SEOL J, et al. Towards an Efficient Tomato Harvesting Robot: 3D Perception, Manipulation, and End-Effector [J]. IEEE Access, 9: 17631-17640.
- [11] ARAD B, BALENDONCK J, BARTH R, et al. Development of a Sweet Pepper Harvesting Robot [J]. Journal of Field Robotics, 2020, 37(6): 1027-1039.
- [12] 王志豪. 基于 RGB-D 图像和深度学习的抓取配置预测 [D]. 济南:山东大学, 2020.
- [13] 刘运炜. 基于 RealSense 的手语手势识别系统开发 [D]. 哈尔滨:黑龙江大学, 2020.
- [14] 杜福洲, 叶晗鸣. 基于视觉的大尺度部件相对位姿实时测量方法研究 [J]. 航空制造技术, 2021, 64(6): 34-40, 47.
- [15] 孙鹏飞, 郭喜庆, 杨敬娴. 二自由度云台的机器视觉控制 [J]. 光电工程, 2012, 39(10): 135-142.
- [16] GRAIG J J. 机器人学导论 [M]. 3版. 贠超,译. 北京: 机械工业出版社, 2006.
- [17] TSAI R Y, LENZ R K. A New Technique for Fully Autonomous and Efficient 3D Robotics Hand/Eye Calibration [J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 1989, 5(3): 345-358.
- [18] CHAUMETTE F, HUTCHINSON S. Visual Servo Control. I. Basic Approaches [J]. IEEE Robotics & Automation Magazine, 2006, 13(4): 82-90.

责任编辑 王新娟