

基于视觉伺服的温室番茄植株主茎跟踪与测量方法

冯青春^{1,2} 王 秀^{2,3} 刘继展⁴ 成 伟^{2,3} 陈 建¹

(1. 中国农业大学工学院, 北京 100083; 2. 北京农业智能装备技术研究中心, 北京 100097;
3. 农业智能装备技术北京市重点实验室, 北京 100097; 4. 江苏大学农业装备工程学院, 镇江 212013)

摘要: 根据温室番茄智能管理作业视觉信息获取需求,研究了番茄植株主茎动态跟踪与立体测量方法,以提高对叶、果和花等目标的搜索效率。结合工厂化番茄种植特征,采用二自由度双目云台摄像机采集植株主茎图像;在对摄像机与旋转云台之间坐标关系进行标定的基础上,提出针对番茄植株主茎图像跟踪采集的云台伺服控制方法,对作业区域内植株进行自下而上多视角图像动态采集;对相邻视场主茎重叠区域的图像匹配方法进行研究,实现了植株离散图像的拼接和形态恢复;基于主茎跟踪参考点的空间坐标信息,研究了作业区域主茎长度、高度和生长倾角等立体形态参数的测量方法;最后,通过现场试验对主茎拼接与测量方法进行验证。结果表明,在距地面高度600~1 500 mm 作业区域内,视觉系统跟踪采集的主茎3个区域图像的平均拼接偏差为3.77°;以人工测量结果为对照,采用视觉系统测量主茎长度、高度和生长倾角的决定系数分别为0.993 3、0.842 6、0.979 3,平均测量偏差分别为46.20 mm、18.60 mm和4.33°。本研究可为番茄智能化整枝、采摘和授粉等作业视觉信息获取提供技术支撑。

关键词: 番茄植株; 主茎形态; 农业机器人; 视觉伺服; 立体测量

中图分类号: S641.2; TP242.6 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2020)11-0221-08 OSID: 

Tracking and Measuring Method of Tomato Main-stem
Based on Visual Servo

FENG Qingchun^{1,2} WANG Xiu^{2,3} LIU Jizhan⁴ CHENG Wei^{2,3} CHEN Jian¹

(1. College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China
2. Beijing Research Center of Intelligent Equipment for Agriculture, Beijing 100097, China
3. Beijing Key Laboratory of Intelligent Equipment Technology for Agriculture, Beijing 100097, China
4. School of Agricultural Equipment Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract: Aiming at target’s visual information acquisition for robotic management in tomato greenhouse, the method of tracking and measuring the plant’s main-stem was researched, which was supposed to improve the detection efficiency on the object, such as fruit, leaf and flower. According to the tomato’s factory-planted condition in greenhouse, a binocular vision system with two-freedom pan-tilt mechanism was adopted to capture plant’s image and the calibration on the relationship between camera and pan-tilt coordinates data was introduced. The pan-tilt’s servo control method for tracking the plant’s main-stem was proposed, so that the camera could automatically capture the plants bottom-up images. The image matching method for splicing the discrete main-stem in the adjacent view-fields was researched, so as to recover the plant’s image morphology. Based on the 3D coordinate data of a series of tracking reference points, the main-stem’s length, vertical height, and inclination angle could be estimated. Finally, the method for tracking and measuring tomato’s main-stem was tested in greenhouse. As the result showed, in the working area from 600 mm to 1 500 mm high from the ground, the vision system could capture three images of various view-fields, and the main-stem’s average splicing deviation was 3.77°. Compared with manual measurement results, the results of the automatic measurement method on main-stem’s length, vertical height and inclination angle, respectively had the determination coefficients of 0.993 3, 0.842 6

收稿日期: 2020-02-17 修回日期: 2020-05-03
基金项目: 国家自然科学基金项目(61703048)、北京市农林科学院青年科研基金项目(QNJ201722)和江苏大学农业装备学部项目(4111680002)
作者简介: 冯青春(1987—),男,博士生,北京农业智能装备技术研究中心副研究员,主要从事农业机器人研究,E-mail: fengqc@mercita.org.cn
通信作者: 陈建(1982—),男,副教授,博士,主要从事无人系统控制研究,E-mail: jchen@cau.edu.cn

and 0.979 3, and the average deviations of 46.20 mm, 18.60 mm and 4.33°, respectively. In view of the performance on tracking and measuring target, the method was expected to be a support for researching on tomato's automatic pruning, harvesting and pollinating.

Key words: tomato plant; main-stem morphology; agricultural robot; visual servo; stereo measurement

0 引言

我国是鲜食番茄的生产和消费大国^[1]。近年来,番茄种植管理人工成本不断上涨,已达到总生产成本的35%以上^[2],其中,整枝打叶、授粉、采摘以及喷药等劳动密集环节消耗整个生产周期人力投入的70%以上^[2]。因此,研发代替或辅助人工作业的种植管理机器人^[3-8]对于番茄种植产业可持续发展具有重要意义。作业对象的视觉信息获取是支撑机器人作业的重要前提^[9]。然而,番茄植株丛生交错,作业对象(果、叶、花)沿主茎随机生长、相互重叠遮挡,且植株行间空间狭窄,对其进行大视场图像采集处理存在成像物距小、冗余干扰多的问题。借鉴人工作业方式,跟踪采集其不同区域的离散小视场图像、沿植株主茎对不同作业对象进行搜索是提高作业对象识别和定位效率的有效途径。

对离散视场图像配准和拼接是获取番茄主茎整体形态特征的必要途径。目前,图像配准方法可分为图像特征配准和摄像机姿态配准:图像特征配准通过提取角点^[10-11]、轮廓线^[12]和区域块^[13-15]等特征,基于几何不变原理估计图像之间的运动关系,该方法对图像采集设备要求不高,但提取特征运算复杂、实时性差,多用于非实时图像的融合应用;摄像机姿态匹配通过实时获取摄像机空间位姿参数^[16-17],基于透视成像原理解析不同视角下目标形态的变换关系^[18-19],该方法数据融合精度高、实时性好,但是硬件结构复杂、通用性差。鉴于番茄植株丛生无序、背景复杂多样的特征,需要结合上述两类方法对多视角不同区域图像进行融合,以满足机器人作业视觉信息动态获取需要。

本文面向工厂化番茄智能化管理需求,以作业区域植株图像跟踪采集为目的,研究基于双目云台摄像机的主茎离散区域图像采集伺服控制方法,并通过融合多视角植株图像特征,实现番茄主茎的图像拼接与立体形态测量,从而为采摘、整枝、授粉等作业智能装备的研发提供技术支撑。

1 多视角立体视觉系统设计

1.1 工厂化番茄种植环境

工厂化番茄种植环境如图1所示,番茄种植行距约1 100 mm、株距300 mm。距地面高度600 ~

1 500 mm 的区域为番茄整枝、打叶、采摘等管理环节的作业区域。随着植株不断生长,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,因此本文以该高度区域内的番茄植株为探测对象。智能管理作业平台以植株行间轨道为支撑进行移动,其视觉系统实时获取两侧番茄植株图像信息。

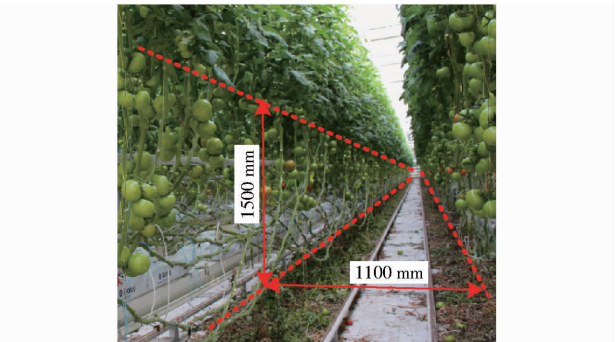


图1 工厂化番茄种植环境
Fig.1 Tomato factory-planted environment

1.2 双目云台图像采集系统

单株番茄管理作业区域宽300 mm、高900 mm,且该区域番茄主茎呈倾斜姿态,为了避免大视场图像冗余信息干扰,需通过拼接多个小视场图像以覆盖该条形作业区域。如图2所示,图像采集系统包括双目摄像机和二自由度云台机构。鉴于番茄茎秆在近红外波段具有强反射特征^[20],摄像机选用Basler公司acA1300-60gmNIR摄像机,并搭配1/3" CCD、8 mm焦距镜头和(900 ± 20) nm滤光片,距番

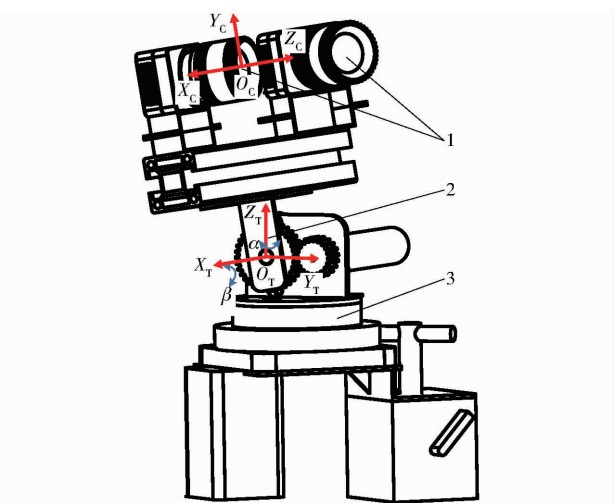


图2 双目云台视觉系统
Fig.2 Binocular pan-tilt vision system
1. 双目摄像机 2. 垂直旋转机构 3. 水平旋转机构

茄植株 900 mm 位置,可获得约宽 450 mm、高 400 mm 视场区域图像。云台可进行垂直和水平旋转,以调整摄像机空间姿态从不同视角采集番茄植株不同区域的图像。

1.3 视觉系统参数标定

视觉系统参数包括摄像机自身透视成像参数和外部结构参数,明确视觉系统参数是根据图像二维数据获取立体视觉信息的必要前提。本文略去双目摄像机参数标定过程^[21],重点描述双目摄像机与旋转云台的坐标转换关系标定。如图 2 所示,双目摄像机坐标系 $O_cX_cY_cZ_c$ 原点 O_c 位于左摄像机感光芯片中心, X_c 轴和 Y_c 轴分别与芯片水平和垂直中心线重合, Z_c 轴与镜头光心重合。云台坐标系 $O_TX_TY_TZ_T$ 中 Z_T 轴为其水平旋转轴, X_T 轴为其垂直旋转轴,原点 O_T 为两轴交点。若云台依次绕 Z_T 轴和 X_T 轴水平和垂直旋转角分别为 α 和 β ,根据欧拉角旋转矩阵^[22]表示方法,坐标系 $O_TX_TY_TZ_T$ 相对姿态变换矩阵可表示为

$$B = \begin{bmatrix} R_B & t_B \\ O & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\alpha & -\sin\alpha\cos\beta & \sin\alpha\sin\beta & 0 \\ \sin\alpha & \cos\alpha\cos\beta & -\cos\alpha\sin\beta & 0 \\ 0 & \sin\beta & \cos\beta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中 R_B ——旋转矩阵

t_B ——平移向量

O ——维度为 3 的零向量

设坐标系 $O_TX_TY_TZ_T$ 和 $O_cX_cY_cZ_c$ 之间的转换矩阵为 T 。标定过程中,通过 2 次设置云台转角增量 α_1, β_1 和 α_2, β_2 获得 3 个云台姿态,摄像机分别从 3 个视角拍摄固定放置的棋盘靶标。靶标表面点 P 在两个坐标系中的坐标表示为 P_{Ci} 和 P_{Ti} 。若已知摄像机内部参数,处于姿态 i 的摄像机与靶标平面坐标系转换关系可确定为 H_i ^[23],于是姿态 i 和 $i+1$ 下固定点 P 的摄像机坐标 P_{Ci} 和 $P_{C,i+1}$ 存在关系 $H_{i+1}P_{C,i+1} = H_iP_{Ci}$ 。如此可得,摄像机坐标系在 i 和 $i+1$ 姿态之间的转换矩阵为 $A_{i+1}^{(i)} = H_i^{-1}H_{i+1}$ 。此外,设云台坐标系在 i 和 $i+1$ 姿态之间的转换矩阵为 $B_{i+1}^{(i)}$,如式(1)所示,由云台旋转增量角确定。于是 $P_{C,i}, P_{C,i+1}, P_{Ti}$ 和 $P_{T,i+1}$ 存在关系

$$\begin{cases} P_{C,i} = A_{i+1}^{(i)} P_{C,i+1} \\ P_{C,i+1} = TP_{T,i+1} \\ P_{Ti} = B_{i+1}^{(i)} P_{T,i+1} \\ P_{C,i} = TP_{Ti} \end{cases} \quad (2)$$

由式(2)消去 P_{Ci} 和 P_{Ti} ,代入不同姿态之间 $A_{i+1}^{(i)}$ 和 $B_{i+1}^{(i)}$ 变换关系,可得

$$\begin{cases} A_2^{(1)} T = TB_2^{(1)} \\ A_3^{(2)} T = TB_3^{(2)} \end{cases} \quad (3)$$

其中 T 为待求矩阵,其旋转矩阵和平移向量分别为 R_B 和 t_B ,令已知转换矩阵 $A_2^{(1)}, A_3^{(2)}, B_2^{(1)}$ 和 $B_3^{(2)}$ 确定旋转轴方向单位向量分别为 a, a', b 和 b' ,由式(3)可解得 R_B ^[24] 为

$$R_B = [a \ a' \ a \times a'] [b \ b' \ b \times b']^{-1} \quad (4)$$

将 R_B 代入式(3),可得 t_B ,从而完成坐标系 $O_TX_TY_TZ_T$ 和 $O_cX_cY_cZ_c$ 之间转换矩阵 T 的标定。

2 番茄主茎图像跟踪采集

2.1 图像跟踪采集原理

根据番茄主茎形态变化动态调整摄像机姿态,是番茄植株图像跟踪采集的基本原理。如图 3 所示,摄像机视场内主茎中心线上端、下端和中间点图像坐标分别为 (u_{top}, v_{top}) 、 (u_{bottom}, v_{bottom}) 和 (u_{centor}, v_{centor}) 。考虑到摄像机自下而上采集番茄植株图像,且图像边缘畸变误差较大,因此以 (u_{centor}, v_{centor}) 为跟踪起始参考点、 (u_{bottom}, v_{bottom}) 为跟踪目标参考点。同一视场内两个参考点对应的摄像机坐标 (x_c, y_c, z_c) 和 (x'_c, y'_c, z'_c) 可由双目摄像机测量得到。

摄像机由姿态 i 调整为 $i+1$,主茎表面点 P 需从起始参考点移动至目标参考点,即其图像坐标由 (u_{centor}, v_{centor}) 向下移动至 (u_{bottom}, v_{bottom}) 。鉴于在小视场区域内植株主茎形态变化有限,可认为在姿态 i 和 $i+1$ 下,摄像机视场中图像坐标 (u_{bottom}, v_{bottom}) 对应的摄像机坐标近似为 (x'_c, y'_c, z'_c) 。

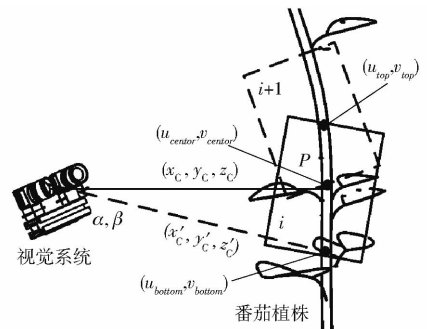


图 3 多视角图像跟踪采集

Fig. 3 Multi-view image capturing

2.2 摄像机姿态伺服控制

摄像机姿态伺服控制根据参考点在摄像机坐标系中的预期位置,控制云台旋转位移增量进行视觉跟踪。由式(2)可得,摄像机连续姿态下点 P 的当前坐标 (x_c, y_c, z_c) 和预期坐标 (x'_c, y'_c, z'_c) 存在关系

$$T^{-1} \begin{bmatrix} x_c & y_c & z_c & 1 \end{bmatrix}^T = B_{i+1}^{(i)} T^{-1} \begin{bmatrix} x'_c & y'_c & z'_c & 1 \end{bmatrix}^T \quad (5)$$

其包含未知数 $\alpha_{i+1}^{(i)}$ 和 $\beta_{i+1}^{(i)}$ 为云台依次绕 Z_T, X_T 轴旋

转的角位移增量。设空间点 P 的云台坐标系坐标表示为 (x_T, y_T, z_T) , 式(5)可表示为

$$\begin{bmatrix} x_T & y_T & z_T & 1 \end{bmatrix}^T = \mathbf{B}_{i+1}^{(i)} \begin{bmatrix} x'_T & y'_T & z'_T & 1 \end{bmatrix}^T \quad (6)$$

将式(1)代入式(6)可得

$$\begin{cases} x'_T \cos \alpha_{i+1}^{(i)} - y'_T \sin \alpha_{i+1}^{(i)} \cos \beta_{i+1}^{(i)} + z'_T \sin \alpha_{i+1}^{(i)} \sin \beta_{i+1}^{(i)} = x_T \\ x'_T \sin \alpha_{i+1}^{(i)} + y'_T \cos \alpha_{i+1}^{(i)} \cos \beta_{i+1}^{(i)} - z'_T \cos \alpha_{i+1}^{(i)} \sin \beta_{i+1}^{(i)} = y_T \\ y'_T \sin \beta_{i+1}^{(i)} + z'_T \cos \beta_{i+1}^{(i)} = z_T \end{cases} \quad (7)$$

由方程 $y'_T \sin \beta_{i+1}^{(i)} + z'_T \cos \beta_{i+1}^{(i)} = z_T$ 解得 $\beta_{i+1}^{(i)} = \arcsin(z_T / \sqrt{y'^2_T + z'^2_T}) - \varphi$, 其中 $\varphi = \arctan(z'_T / y'_T)$, 将 $\beta_{i+1}^{(i)}$ 代入式(7)中其他方程, 可得 $\alpha_{i+1}^{(i)} = \arcsin(x_T / \sqrt{x'^2_T + m^2}) - \phi$, 其中 $\phi = \arctan(x'_T / m)$, $m = z'_T \sin \beta_{i+1}^{(i)} - y'_T \cos \beta_{i+1}^{(i)}$ 。

3 番茄主茎拼接与测量

3.1 离散主茎图像形态拼接

假定采集图像过程中番茄植株保持静止, 则获得的序列图像中主茎的形态变化仅与摄像机的姿态调整有关。相邻姿态所得图像 i 和 $i+1$ 存在高度为 $v_{center} - v_{top}$ 的重叠区域, 因此根据重叠像素配准约束可获得不同视角下主茎的图像形态变换关系。

如图4所示, 在图像 i 中设定高、宽分别为 $h = |v_{center} - v_{top}|$ 和 $w = |u_{top} - u_{center}|$ 的矩形模板域, 分别以主茎上端点和中间点为对角点。同理, 在图像 $i+1$ 中设定同样大小的待匹配区域, 以主茎下端点 (u_{bottom}, v_{bottom}) 为旋转原点, 以 $\Delta\theta = 10^\circ$ 为步长, 依次旋转获得一系列候选区域。鉴于相邻视场主茎相对旋转角度为锐角, 因此模板旋转角 θ 范围为 $-90^\circ \sim 90^\circ$ 。

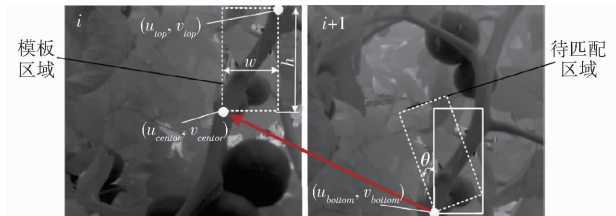


图4 相邻视场主茎图像匹配

Fig.4 Adjacent view-field images matching

采用像素灰度差值绝对值和(SAD)表示模板区域和候选区域的相似度^[25-26], 计算公式为

$$S_{AD} = \frac{1}{M} \sum_A |g_{\theta}^{(i+1)} - g^{(i)}| \quad (8)$$

式中 S_{AD} ——像素灰度差值绝对值和

A ——匹配区域

M —— A 区域内像素数量

$g_{\theta}^{(i+1)}$ ——候选区域像素点 $(u_{\theta}^{(i+1)}, v_{\theta}^{(i+1)})$ 的灰度

$g^{(i)}$ ——模板区域 $(u^{(i)}, v^{(i)})$ 的灰度

考虑到旋转会造成其部分区域超出图像范围, 因此仅对图像 $i+1$ 与候选区域的有效重叠像素进行匹配。在候选区域中 S_{AD} 取最小值对应的 θ 为图像 $i+1$ 相对图像 i 的最优拼接旋转角 $\theta_i^{(i+1)}$, 旋转中心为目标参考点 $(u_{bottom}^{(i+1)}, v_{bottom}^{(i+1)})$ 。旋转后图像像素 $(u^{(i+1)}, v^{(i+1)})$ 移动至可与图像 i 拼接的位置 $(u_i^{(i+1)}, v_i^{(i+1)})$, 其关系可表示为

$$\begin{bmatrix} v_i^{(i+1)} \\ u_i^{(i+1)} \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & v_{bottom}^{(i+1)} \\ 0 & -1 & u_{bottom}^{(i+1)} \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta_i^{(i+1)} & -\sin \theta_i^{(i+1)} & 0 \\ \sin \theta_i^{(i+1)} & \cos \theta_i^{(i+1)} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & -v_{bottom}^{(i+1)} \\ 0 & -1 & u_{bottom}^{(i+1)} \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v^{(i+1)} \\ u^{(i+1)} \\ 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

图像旋转变换后, 使两幅图像的起始和目标跟踪参考点重合, 即可实现主茎相邻区域图像形态拼接。

3.2 跟踪参考点坐标转换

摄像机在跟踪采集图像过程中其坐标系动态变化, 因此, 不同姿态下参考点的摄像机坐标数据需要进行统一。设摄像机特定姿态 i 下, 视场内起始参考点 P_i 的摄像机坐标为 $(x_{Ci}^{(i)}, y_{Ci}^{(i)}, z_{Ci}^{(i)})$, 其可由双目摄像机测量得到。若以初始姿态摄像机坐标系为标准, 由式(6)可得, 点 $(x_{Ci}^{(i)}, y_{Ci}^{(i)}, z_{Ci}^{(i)})$ 与其在标准坐标系下的坐标 $(x_{Ci}^{(0)}, y_{Ci}^{(0)}, z_{Ci}^{(0)})$ 存在关系为

$$\mathbf{T}^{-1} \begin{bmatrix} x_{Ci}^{(i)} & y_{Ci}^{(i)} & z_{Ci}^{(i)} & 1 \end{bmatrix}^T = \mathbf{B}_{i-1}^{(i)} \cdots \mathbf{B}_1^{(2)} \mathbf{B}_0^{(1)} \mathbf{T}^{-1} \begin{bmatrix} x_{Ci}^{(0)} & y_{Ci}^{(0)} & z_{Ci}^{(0)} & 1 \end{bmatrix}^T \quad (10)$$

整理式(10), $(x_{Ci}^{(0)}, y_{Ci}^{(0)}, z_{Ci}^{(0)})$ 可表示为

$$\begin{bmatrix} x_{Ci}^{(0)} & y_{Ci}^{(0)} & z_{Ci}^{(0)} & 1 \end{bmatrix}^T = \mathbf{T} \mathbf{B}_i^{(0)} \mathbf{T}^{-1} \begin{bmatrix} x_{Ci}^{(i)} & y_{Ci}^{(i)} & z_{Ci}^{(i)} & 1 \end{bmatrix}^T \quad (11)$$

其中 $\mathbf{B}_i^{(0)}$ 为云台由初始姿态向姿态 i 的转换矩阵, 其由跟踪采集过程中云台处于姿态 i 时的转角增量 $\alpha_0^{(i)}$ 和 $\beta_0^{(i)}$ 确定。

3.3 主茎立体形态参数测量

番茄主茎立体形态信息是机器人抓取目标和规避干涉进行路径规划的重要依据。如图5所示, 已知主茎不同区域的参考点 P_i 在标准坐标系下的坐标 $(x_{Ci}^{(0)}, y_{Ci}^{(0)}, z_{Ci}^{(0)})$, 可得其整体空间形态参数长度 L 、垂直高度 H 和生长倾角 ω 。其中番茄主茎总长度 L 可表示为

$$L = \sum_{i=1}^N \sqrt{(x_{Ci}^{(0)} - x_{C,i-1}^{(0)})^2 + (y_{Ci}^{(0)} - y_{C,i-1}^{(0)})^2 + (z_{Ci}^{(0)} - z_{C,i-1}^{(0)})^2} \quad (12)$$

式中 N ——主茎不同区域的参考点总数

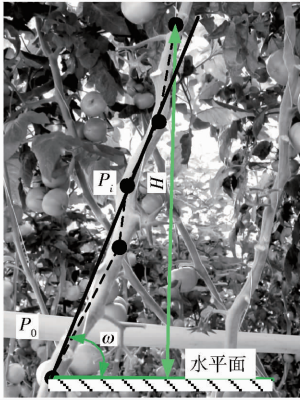


图 5 主茎立体形态测量

Fig. 5 Main-stem morphology measurement

若设定标准坐标系 $Z_c^{(0)}$ 轴与地面平行,则参考点在 Y_c 轴方向的最大坐标值 $\max \{y_{Ci}^{(0)}\}$ 可表示为番茄植株主茎的垂直高度 H 。

将番茄主茎形态近似为空间直线,且直线经过主茎的参考点 $(x_{c0}^{(0)}, y_{c0}^{(0)}, z_{c0}^{(0)})$,则该直线可表示为

$$\frac{x - x_{c0}^{(0)}}{k_1} = \frac{y - y_{c0}^{(0)}}{k_2} = \frac{z - z_{c0}^{(0)}}{k_3} \quad (13)$$

式中 (k_1, k_2, k_3) ——主茎空间方向向量

令 $a = k_1/k_2, b = k_2/k_3$,化简式(13)可得

$$\begin{cases} x = a(z - z_{c0}^{(0)}) + x_{c0}^{(0)} \\ y = b(z - z_{c0}^{(0)}) + y_{c0}^{(0)} \end{cases} \quad (14)$$

若参考点总数为 N ,则离散参考点与拟合直线偏差可表示为

$$\begin{cases} \Delta x = \sum_{i=0}^N [x_{Ci}^{(0)} - a(z_{Ci}^{(0)} - z_{c0}^{(0)}) - x_{c0}^{(0)}]^2 \\ \Delta y = \sum_{i=0}^N [y_{Ci}^{(0)} - b(z_{Ci}^{(0)} - z_{c0}^{(0)}) - y_{c0}^{(0)}]^2 \end{cases} \quad (15)$$

根据最小二乘算法原理,由式(15)分别对 a 和 b 求偏导,并令其偏导为零,求解 a 和 b

$$\begin{cases} a = \frac{\sum_{i=0}^N (x_{Ci}^{(0)} - x_{c0}^{(0)}) (z_{Ci}^{(0)} - z_{c0}^{(0)})}{\sum_{i=0}^N (z_{Ci}^{(0)} - z_{c0}^{(0)})^2} \\ b = \frac{\sum_{i=0}^N (y_{Ci}^{(0)} - y_{c0}^{(0)}) (z_{Ci}^{(0)} - z_{c0}^{(0)})}{\sum_{i=0}^N (z_{Ci}^{(0)} - z_{c0}^{(0)})^2} \end{cases} \quad (16)$$

令 $k_3 = 1$,可得到主茎在标准坐标系中的方向向量 $l = (a, b, 1)$,则其相对地面的生长倾角 $\omega = \arcsin(|b|/\sqrt{a^2 + b^2 + 1})$ 。

4 试验与结果分析

4.1 试验

为了验证番茄主茎跟踪测量方法的实际效果,

在北京市昌平区特菜大观园番茄温室内开展了现场试验(图 6)。随机选择 15 株番茄植株,对距地面高 600 ~ 1 500 mm 的管理作业区域内的主茎进行测量。由于视觉系统的视场高度约 400 mm,为了覆盖作业区域的主茎高度,设定摄像机云台由水平初始姿态自动调整两次,对每株番茄跟踪采集 3 幅图像,并对此序列图像中的主茎形态进行拼接和测量。试验过程中,采用 Cognex VisionPro 图像处理软件,将实时识别离散视场中的主茎像素区域作为跟踪依据,以尽量避免主茎识别算法(本文未涉及)对试验结果的影响。

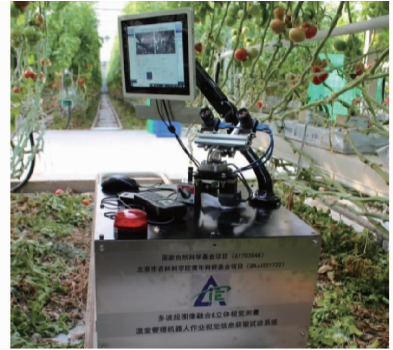


图 6 现场试验

Fig. 6 Field test

4.2 结果分析

试验得到的结果包括每株番茄植株在 3 个不同视场区域的离散图像及其拼接图像、作业区域内主茎长度 L 、垂直高度 H 和生长倾角 ω 。视觉系统对主茎离散图像采集跟踪效果,以视场 i 和 $i+1$ 内目标参考点的图像坐标距离 $D_i^{(i+1)}$ 对连续视场目标参考点实际坐标与预期坐标偏差进行评价。图像拼接效果评估如图 7 所示。对图像 i 和 $i+1$ 匹配拼接后,分别在其重叠区域连接参考点与特定标记点(人工选择同一叶柄与主茎交叉点),根据两幅图中连接线之间的夹角 $\varphi_i^{(i+1)}$ 估计主茎形态拼接精度。对于 L 、 H 和 ω 等立体形态测量精度,以人工测量为对照进行评价。由于主茎为空间悬挂、柔性弯曲状态,且人工测量过程中的接触碰撞可能改变其自然

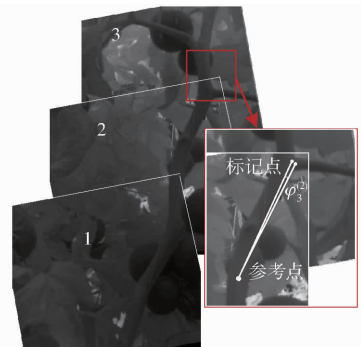


图 7 主茎跟踪和拼接偏差

Fig. 7 Main-stem splicing deviation

形态,因此人工测量结果依然无法准确反映主茎的真实自然形态,本文仅以视觉系统与人工测量结果的相关性评估其对主茎立体形态参数的测量效果。

对番茄植株相邻视场图像目标参考点偏差 $D_1^{(2)}$ 和 $D_2^{(3)}$ 、重叠区域主茎拼接偏差 $\varphi_1^{(2)}$ 和 $\varphi_2^{(3)}$ 、作业区域主茎长度 L 、垂直高度 H 和生长倾角 ω 等参数的测量结果如表1所示。视觉系统对参考点的跟踪偏差最小8像素、最大25像素、平均21像素,分别相

当于主茎像素宽度的20%、62%和42%;主茎拼接偏差最小2°、最大8°、平均3.77°,且 $D_2^{(3)}$ 和 $\varphi_2^{(3)}$ 均大于 $D_1^{(2)}$ 和 $\varphi_1^{(2)}$,原因在于第3视场内主茎比第1视场相距摄像机更远,具有较大的图像畸变幅度,使得其各自目标参考点成像位置发生更大的偏移,即 $D_2^{(3)}$ 呈较大值,同时不同视场对应主茎像素尺寸差异增加,使得灰度匹配误差增大,即 $\varphi_2^{(3)}$ 呈现较大值。

表 1 试验结果
Tab.1 Test results

植株序号	跟踪偏差/像素		拼接偏差/(°)		长度 L /mm		高度 H /mm		倾角 ω /(°)	
	$D_1^{(2)}$	$D_2^{(3)}$	$\varphi_1^{(2)}$	$\varphi_2^{(3)}$	自动测量	人工测量	自动测量	人工测量	自动测量	人工测量
1	18	23	5	7	1 181	1 283	852	875	45	52
2	10	16	2	3	805	817	789	796	80	85
3	12	15	2	4	903	911	862	850	75	80
4	15	16	4	4	858	864	823	820	76	79
5	14	18	3	5	833	853	786	796	73	75
6	12	13	3	3	984	1 055	856	896	58	65
7	20	25	6	8	1 505	1 653	953	902	38	45
8	18	23	5	4	1 173	1 285	932	895	50	53
9	8	13	2	3	882	892	795	805	68	72
10	13	16	3	3	899	915	834	819	75	76
11	15	18	4	4	948	997	889	876	78	81
12	13	14	3	3	788	801	743	738	83	84
13	15	16	4	4	1 002	1 093	881	865	65	69
14	9	12	2	3	947	962	873	851	72	78
15	13	16	3	4	913	933	810	825	68	75

主茎立体形态参数 L 、 H 和 ω 自动与人工测量值相关性统计如图8所示。由于人工采用软尺可精确贴合主茎,主茎长度的人工测量数据均大于视觉自动测量,二者决定系数为0.9933(图8a),最大偏差148.00 mm(相对偏差8.95%)、最小偏差6.00 mm(相对偏差0.69%)、平均偏差46.20 mm(相对偏差3.94%)。主茎高度的人工测量结果与自动测量结果的决定系数为0.8426(图8b),测量偏差最大为51.00 mm(相对偏差5.65%)、最小3.00 mm(相对偏差0.37%)、平均18.60 mm(相对偏差2.21%)。受重力作用番茄主茎多呈凹曲线形态,人工测量得

到的生长倾角为其两端连线的倾角,而自动测量得到多点拟合直线倾角,因此人工测量的生长倾角均大于自动测量,二者决定系数为0.9793(图8c),角度偏差最大7.00°(相对偏差15.56%)、最小1.00°(相对偏差1.19%)、平均4.33°(相对偏差6.58%)。

此外如图9所示,对于作业区域内生长倾角较大、直立程度较高的主茎,视觉系统具有较高的测量精度;反之,对于倾斜度较大的主茎测量结果与人工测量存在较大偏差。特别地,对于7号植株其相对地面生长倾角最小,对其形态测量和图像拼接的偏

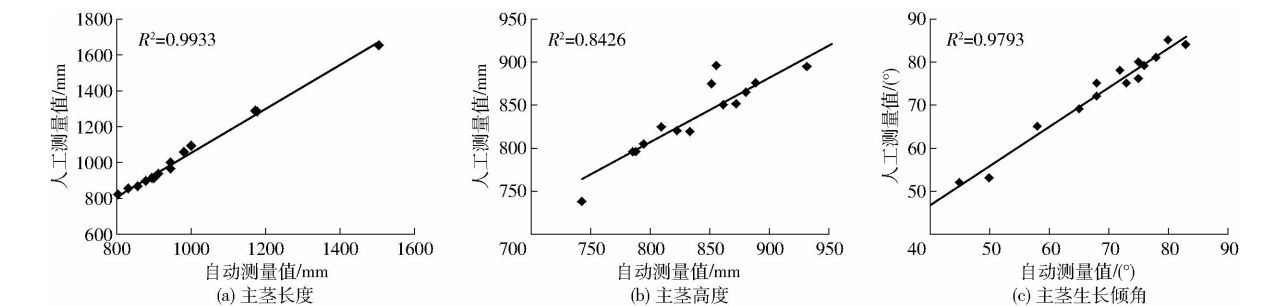


图 8 人工与自动测量结果相关性
Fig.8 Manual and auto measurement results correlation

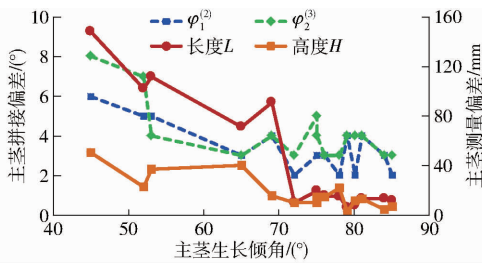


图 9 测量偏差随主茎生长倾角变化曲线

Fig. 9 Measurement deviations with various main-stem's inclination

差最大。原因在于,特定作业高度区域内,主茎长度随其生长倾斜程度变大而增加,其上下两端与固定放置的摄像机之间的距离差异相应增大。由于双目摄像机对于远端目标具有更大测量误差,从而导致视觉系统对于倾斜程度较大的主茎测量误差较大。尽管如此,对于广泛应用的吊线落蔓番茄栽培模式,通过精准收放吊线长度,可有效提高番茄植株直立程度,以确保本文视觉系统获得较高测量精度。

5 结束语

根据工厂化番茄智能化种植管理需求,构建主茎图像动态跟踪采集系统,以提高作业对象视觉信息获取效率。基于双目云台摄像机的植株主茎跟踪与测量方法,可以实现其离散区域图像的采集和拼接,并测量其可见区域的长度、高度和生长倾角等立体形态参数。试验表明,在距地面高度 600 ~ 1 500 mm 作业区域内,采用视觉系统对主茎离散参考点的跟踪偏差最大值和平均值分别为 25 像素和 21 像素,对相邻视场主茎图像拼接偏差的最大值和平均值分别为 8°和 3.77°,对主茎长度、高度和生长倾角测量值与人工测量值的决定系数分别为 0.993 3、0.842 6 和 0.979 3,平均测量偏差分别为 46.20 mm、18.60 mm 和 4.33°,最大相对偏差分别为 8.95%、5.65% 和 15.56%,并且对于直立程度高的植株具有更好的测量效果。本研究可为番茄智能化采摘、打叶和授粉等作业目标视觉搜索提供参考。

参 考 文 献

- [1] 郑伟. 番茄主产区农户生产投入产出调查分析[J]. 农村经济与科技, 2019, 30(9): 112 - 114.
ZHENG Wei. Investigation and analysis of farmers' production input-output in tomato main producing areas[J]. Rural Economy and Technology, 2019, 30(9): 112 - 114. (in Chinese)
- [2] 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: 106 - 115.
- [3] 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(增刊): 71 - 87.
ZHANG Tiezhong, YANG Li, CHEN Bingqi, et al. Research process of agricultural robot technology[J]. Science China, 2010, 40(Supp.): 71 - 87. (in Chinese)
- [4] LI Peilin, LEE Sangheon, HSU Hungyao. Review on fruit harvesting method for potential use of automatic fruit harvesting systems[J]. Procedia Engineering, 2011, 23: 351 - 366.
- [5] BECHAR A, VIGNEAULT C. Agricultural robots for field operations: concepts and components[J]. Biosystems Engineering, 2016, 149: 94 - 111.
- [6] 周俊, 张娜, 孟一猛, 等. 番茄粘弹性参数机器人抓取在线估计[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(8): 26 - 32.
ZHOU Jun, ZHANG Na, MENG Yimeng, et al. Online estimation of tomato viscoelastic parameters during robot grasping[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(8): 26 - 32. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170802&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2017.08.002. (in Chinese)
- [7] 周军平, 郝朝会, 杨学军, 等. 番茄收获机喂入机构运动特性分析与参数优化[J/OL]. 农业机械学报, 2013, 44(增刊2): 75 - 79, 85.
ZHOU Junping, HAO Zhaohui, YANG Xuejun, et al. Motion characteristics analysis and parameter optimization for tomato harvester feed mechanism[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(Supp. 2): 75 - 79, 85. http://www.j-csam.org/jcaam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2013s215&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2013.S2.015. (in Chinese)
- [8] 尹建军, 武传宇, YANG S X, 等. 番茄采摘机器人机械臂避障路径规划[J/OL]. 农业机械学报, 2012, 43(12): 171 - 175, 157.
YIN Jianjun, WU Chuanyu, YANG S X, et al. Obstacle-avoidance path planning of robot arm for tomato-picking robot[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(12): 171 - 175, 157. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20121231&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2012.12.031. (in Chinese)
- [9] HAMUDA E, GLAVIN M, JONES E. A survey of image processing techniques for plant extraction and segmentation in the field[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2016, 125: 184 - 199.
- [10] 黄晓. 基于图像拼接的齿轮尺寸测量系统设计[D]. 郑州: 郑州大学, 2019.
HUANG Xiao. Design of gear size measurement system based on image mosaic[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2019. (in Chinese)

- [11] 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.
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. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20170421&flag=1&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.04.021. (in Chinese)
- [12] 孙国祥,汪小岳,刘景娜,等.基于相位相关的温室番茄植株多模态三维重建方法[J].农业工程学报,2019,35(18):134-142.
SUN Guoxiang, WANG Xiaochan, LIU Jingna, et al. Multi-modal three-dimensional reconstruction of greenhouse tomato plants based on phase-correlation method[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(18): 134-142. (in Chinese)
- [13] 肖顺夫,刘升平,李世娟,等.改进区域增长算法的植株多视图几何重建[J].中国农业科学,2019,52(16):2776-2786.
XIAO Shunfu, LIU Shengping, LI Shijuan, et al. Multi-view geometric reconstruction of plant based on improved region-growing algorithm[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2019, 52(16): 2776-2786. (in Chinese)
- [14] 宋飞,杨扬,杨昆,等.基于双特征的丘陵山区耕地低空遥感图像配准算法[J].北京航空航天大学学报,2018,44(9):1952-1963.
SONG Fei, YANG Yang, YANG Kun, et al. Low-altitude remote sensing image registration algorithm based on dual-feature for arable land in hills and mountains[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2018, 44(9): 1952-1963. (in Chinese)
- [15] 邹建成,李丹.基于阵列图像立体匹配的深度信息获取方法[J].北方工业大学学报,2016,28(3):8-14.
ZOU Jiancheng, LI Dan. Depth information acquisition method based on stereo matching of array images[J]. Journal of North China University of Technology, 2016, 28(3): 8-14. (in Chinese)
- [16] 史传飞,张丽艳,严俊,等.面向大型装备的工业摄影测量技术及实现[J].航空制造技术,2018,61(19):24-30.
SHI Chuanfei, ZHANG Liyan, YAN Jun, et al. Industrial photogrammetry technology and its implementation for large-scale equipment[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2018, 61(19): 24-30. (in Chinese)
- [17] 陈双叶,王善喜.PTZ摄像机跟踪运动目标的智能控制算法的研究[J].计算机科学,2015,42(增刊2):135-139.
CHEN Shuangye, WANG Shanxi. Research on intelligent control method for moving object tracking based on PTZ camera[J]. Computer Science, 2015, 42(Supp.2): 135-139. (in Chinese)
- [18] 张泊宁,杜忠华,鲍科著.基于机器视觉的二轴云台的目标跟踪设计[J].电子设计工程,2019,27(12):152-157.
ZHANG Boning, DU Zhonghua, BAO Kezhu. Targets tracking system of two-axis PTZ based on machine vision[J]. Electronic Design Engineering, 2019, 27(12): 152-157. (in Chinese)
- [19] 关旭宁,吕印晓,张立鹏,等.面向搜索跟踪任务的小型无人机云台补偿控制[J].信息与控制,2016,45(5):537-543.
GUAN Xuning, LÜ Yinxiao, ZHANG Lipeng, et al. Compensation control of miniature UAV gimbal performing searching and tracking tasks[J]. Information and Control, 2016, 45(5): 537-543. (in Chinese)
- [20] FENG Qingchun, CHEN Jian, LI Xinxu, et al. Multi-spectral image fusion method for identifying similar-colored tomato organs[C]//Proceedings of IEEE International Conference on Unmanned Systems and Artificial Intelligence(ICUSAI 2019), Xi'an, China,2019.
- [21] FENG Qingchun, CHEN Jian, WANG Xiu. Visual system with distant-close combined view for agricultural robot[J]. International Agricultural Engineering Journal, 2019, 28(2): 324-329.
- [22] 朱雷鸣,吴晓平,李建伟,等.直角坐标系的欧拉旋转变换及动力学方程[J].海洋测绘,2010,30(3):20-22.
ZHU Leiming, WU Xiaoping, LI Jianwei, et al. The Euler rotation and dynamic equation of rectangular coordinat system[J]. Hydrographic Surveying and Charting, 2010, 30(3): 20-22. (in Chinese)
- [23] 杜冬梅,田昆鹏,姜磊,等.基于Matlab的摄像机标定方法研究[J].河南工程学院学报(自然科学版),2012,24(4):68-71.
DU Dongmei, TIAN Kunpeng, JIANG Lei, et al. Camera calibration method research based on Matlab[J]. Journal of Henan Institute of Engineering(Natural Science Edition), 2012, 24(4): 68-71. (in Chinese)
- [24] SHIU Y C, AHMAD S. Calibration of wrist-mounted robotic sensor by solving homogenous transform equations of the form $AX = XB$ [J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 1989, 5(1): 16-29.
- [25] 刘金鑫,张祺.基于梯度值的自适应窗口立体图像匹配算法[J].计算机与现代化,2012(1):67-69.
LIU Jinxin, ZHANG Qi. Stereo matching algorithm of adaptive window based on gradient[J]. Computer and Modernization, 2012(1): 67-69. (in Chinese)
- [26] 徐弘祯,李世超,季宇寒,等.基于特征点匹配的全景相机图像拼接方法研究[J/OL].农业机械学报,2019,50(增刊):150-158.
XU Hongzhen, LI Shichao, JI Yuhan, et al. Panoramic camera image mosaic method based on feature points[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(Supp.): 150-158. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=2019s024&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.S0.024. (in Chinese)