

黄硕, 杨方, 沈逸君, 等. 果树修剪机远程控制系统设计与试验[J]. 华中农业大学学报, 2025, 44(5): 288-298.
DOI: 10.13300/j.cnki.hnlkxb.2025.05.029

果树修剪机远程控制系统设计与试验

黄硕^{1,2,3}, 杨方^{1,2,3}, 沈逸君¹, 曾浪¹, 何仕豪¹, 潘海兵^{1,2,3}, 李善军^{1,2,3}

1. 华中农业大学工学院, 武汉 430070; 2. 农业农村部长江中下游农业装备重点实验室, 武汉 430070;
3. 农业农村部柑橘全程机械化科研基地, 武汉 430070

摘要 针对果树修剪过程中自动化程度较低的问题, 设计一种基于物联网架构和电液驱动的果树修剪机远程控制系统, 该修剪机的控制系统主要由液压驱动模块、主控模块、通信模块、感知模块、人机交互模块组成, 完成对修剪机关节位姿的监测和远程控制, 配合液压马达的启停完成柑橘果树机械修剪的任务。采用改进的 Denavit-Hartenberg (D-H) 参数法建立果树修剪机的运动学模型, 配合 Matlab Robotic Toolbox 验证修剪机的运动学模型, 配合蒙特卡洛算法求解各修剪机构的理论工作空间; 根据关节运动特点选取相应传感器、控制器和换向阀, 设计物联网系统的应用层控制方案; 基于 UART-Wi-Fi 模块 ESP8266 建立物联网系统的网络层, 实现手机 APP-云服务器-修剪机的远程监控通信; 为方便使用、快速上手, 设计了手机 APP 人机交互界面, 通过人机交互界面实现修剪机关节位姿状态读取和发送控制指令, 自动实现修剪机位姿调整。样机控制试验显示, 各移动关节的定位误差均为 ± 0.5 mm, 各转动关节的定位误差均小于 2° , 具有较高的准确性; 各关节运动至目标行程的控制调节时间在 1.14~9.21 s, 具有合适的控制调节时间。试验结果表明, 该基于物联网架构的果树修剪机具有较高的自动化程度、较简易的操作模式, 在实际果树机械修剪中具有一定的应用价值。

关键词 果树修剪; 机器人运动学; 物联网; D-H 方法; 远程控制

中图分类号 S224.9 **文献标识码** A **文章编号** 1000-2421(2025)05-0288-11

柑橘是世界第一大类水果, 也是我国南方栽培面积最广、经济地位最重要的果树之一, 栽培面积和产量持续稳定增长^[1-2]。果树修剪是柑橘管理中的必要环节, 柑橘机械修剪相较于人工修剪用时少、效率高, 此外可以拓宽行间距, 有助于植株防疫, 降低柑橘树高便于果实收获^[3-4]。目前我国的果树修剪以人工为主, 存在劳动强度大、工作效率低和经济效益差的问题。传统的林木修剪机械多以人工观测后采用手动控制, 需要人工时刻观察并对修剪机械进行定位, 自动化程度较低。随着国内外果园机械装备、精准农业^[5-7]和物联网技术的发展^[8-11], 果园管理阶段的农机自动化作业成为了可能^[12]。

Spagaolo^[13-14]研制了一款立体式修剪机, 由拖拉机牵引及输出液压油提供动力对葡萄藤进行修剪, 利用液压缸的伸缩运动实现机架和刀架的高低角度变换, 该修剪机的单次修剪量大, 大大提高了修剪效率和减轻了劳动强度, 但该修剪机自动化程度低, 对

操作人员的专业知识要求较高。欧盟 TrimBot2020 项目旨在开发算法, 使机器人能够导航不同地形、自动避障、自动识别并靠近灌木, 并通过手眼标定和根据修剪评估体系, 自动完成对灌木和玫瑰的精细修剪, 但受末端执行机构和机械臂结构的局限, 该机器人只能对灌木和玫瑰枝进行小范围的精细修剪, 虽然智能化程度很高, 但修剪效果经专业园艺师评估, 仅能达到园艺修剪要求的 50% 左右^[15-19]。国内对修剪机械的研究正处于高速发展的阶段, Wang 等^[20]、黄良玉等^[21]研制的架空线路走廊树枝切割机器人用于对架空线路外部的树枝进行修剪, 提出了用于分布式多机器人系统的无线网络拓扑控制策略, 对山区等人工不好到达的地区机器人进行远程控制, 但该网络的稳定性有待进一步提高, 且多机器人系统的同通道信号存在互相干扰。李扬等^[22]研发了一种高枝修剪机, 采用摄像头辅助观察待修剪树枝的相对位置, 开发了人机交互界面进行修枝臂的姿

收稿日期: 2024-12-24

基金项目: 湖北省重点研发计划项目 (2021BBA091; 2023BBB119); 国家重点研发计划重点专项项目 (2024YFD1200500)

黄硕, E-mail: hzauhs@163.com

通信作者: 杨方, E-mail: yangfang@mail.hzau.edu.cn

态控制和锯切定位,不足之处是只能基于工作人员的观察进行机械臂姿态手动控制,未能实现机械臂姿态的自主定位和自动控制,定位效率有待提高。

为提高修剪机械的自动化和智能化程度,本研究针对笔者所在课题组前期研制的一款以液压为驱动力的回转和往复式的果树单边修剪机设计和开发了控制方案和人机交互系统,该系统利用D-H参数法建立运动学模型^[23],通过坐标变换求得修剪机正逆运动学解^[24],通过蒙特卡洛法^[25]解算得到机器人理论作业空间^[26],设计总体控制方案和人机交互系统,并对控制效果进行测试,旨在为后期智慧果园云管理、物联网集成奠定基础。

1 材料与方法

1.1 果树修剪机总体硬件结构和控制系统

果树修剪机的总体硬件结构和控制系统如图1所示。根据柑橘树枝生长粗细分布,果树修剪机上部修剪装置采用往复式切割器,下部修剪装置和中部修剪装置采用圆盘锯片切割器,可剪枝干直径最大为50 mm^[27],修剪机械的总体动力来源于全地形液压动力平台,液压动力平台可通过配套遥控器实现远程遥控移动、转弯、动力输出、动力变换,动力平台直线行驶偏移率为2.2%,原地转弯半径为905 mm,可适应丘陵山地果园坡地作业环境^[28],液压泵将动力平台中的液压油泵入到液压马达和液压缸,实现修剪装置启停和关节机架位姿调整。采用24 V直流电源实现对各传感器、电磁换向阀和控制器的电源供给。以手机软件终端作为上位机,负责监测传感器数据和用于输入操作指令。上位机通过云服务器和WiFi模块实现和STC89C52控制器的通信,下达控制指令来控制各修剪机构和关节的位姿变换。控制器可根据目标姿态通过运动学模型逆解自动调整,通过电磁换向阀等控制元件控制关节位姿变换,实现修剪机的工作高度、宽度和角度的调整,以适应丘陵地区果园坡度大,地形崎岖的复杂地形环境,中部修剪装置、上部修剪装置和下部修剪装置的角度调节可分别用角度调节液压缸、上部调节液压缸和下部调节液压缸的伸缩实现,以满足柑橘果树机械修剪的要求。图2是基于云服务的果树修剪机远程控制方案示例,来自各个传感器的数据在云端实现数据融合,用户可以通过手机APP与修剪机控制系统进行远程交互。



图1 果树修剪机控制系统硬件结构图

Fig.1 Trimming robot control system hardware structure diagram

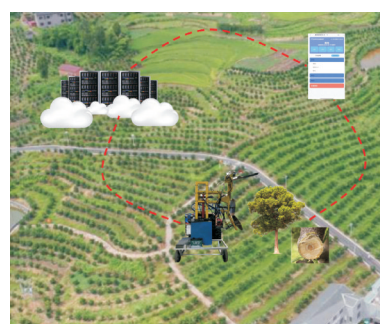


图2 基于云服务的果树修剪机远程控制方案示例

Fig.2 Example of remote control scheme for orchard trimming robot based on cloud analytics service

1.2 果树修剪机运动学分析与仿真

机器人运动学分析的目的是确定末端执行机构的位姿与机械臂关节变量之间的关系,采用改进的D-H参数法建立果树修剪机的运动学方程,将修剪机视为由关节杆件串联的运动链,依次对上、下部末端修剪机构建立运动学方程,并利用蒙特卡洛法求解各末端修剪机构的末端作业空间。影响果树修剪机各末端执行机构姿态的关节包括竖直移动关节、水平移动关节、中部水平回转关节以及上下部末端回转关节,按照D-H参数法依次建立坐标系 $\{O_0\} \sim \{O_5\}$ 。如图3所示,红色坐标系表示回转关节,蓝色坐标系表示基坐标系和平移关节,其中,坐标系 $\{O_0\}$ 与 $\{O_1\}$ 建立在竖直移动关节臂中央, $\{O_2\}$ 建立在水平移动关节臂中央, $\{O_3\}$ 建立在中部水平回转关节的几何中心, $\{O_4\}$ 与 $\{O_5\}$ 分别建立在上下部末端回转关节的几何中心,分别将上下部末端修剪机构视为串联机械臂,分别对其运动学方程进行求解,各关节参数的变化范围见表1和表2。

得到上部修剪机构的齐次变换矩阵:

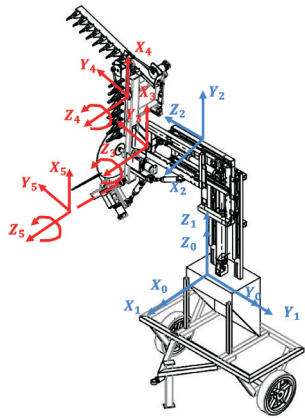


图3 修剪机连杆坐标系

Fig.3 Trimming robot linkage coordinate system

表1 上部修剪机D-H参数

Table 1 Upper trimmer D-H parameter list

i	$\alpha_i/(\circ)$	a_i/mm	d_i/mm	$\beta_i/(\circ)$	关节变量范围/(mm/ \circ) Range of joint variables
1	0	0	d_1	0	0~350
2	90	140	d_2	90	0~200
3	90	0	420	θ_1	-15~5
4	0	466.486	0	θ_2	-23~0

表2 下部修剪机D-H参数

Table 2 Bottom trimmer D-H parameter list

i	$\alpha_i/(\circ)$	a_i/mm	d_i/mm	$\beta_i/(\circ)$	关节变量范围/(mm/ \circ) Range of joint variables
1	0	0	d_1	0	0~350
2	90	140	d_2	90	0~200
3	90	0	420	θ_1	-15~5
5	0	-457.503	0	θ_3	46~70

$${}^4_0T = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 560 \\ -\sin \theta_1 \cos \theta_2 - \cos \theta_1 \sin \theta_2 & \sin \theta_1 \sin \theta_2 - \cos \theta_1 \cos \theta_2 & 0 & -466.486 \cdot \sin \theta_1 - d_2 \\ \cos \theta_1 \cos \theta_2 - \sin \theta_1 \sin \theta_2 & -\sin \theta_1 \cos \theta_2 - \cos \theta_1 \sin \theta_2 & 1 & 466.486 \cdot \cos \theta_1 + d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

对于式(1),带入对应关节的位移 d_i 和关节角度 θ_i 即可求得上部修剪机构的姿态和位置,同理,下部

$${}^5_0T = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 560 \\ -\sin \theta_1 \cos \theta_3 - \cos \theta_1 \sin \theta_3 & \sin \theta_1 \sin \theta_3 - \cos \theta_1 \cos \theta_3 & 0 & 457.503 \cdot \sin \theta_1 - d_2 \\ \cos \theta_1 \cos \theta_3 - \sin \theta_1 \sin \theta_3 & -\sin \theta_1 \cos \theta_3 - \cos \theta_1 \sin \theta_3 & 1 & -457.503 \cdot \cos \theta_1 + d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

对于式(2),带入对应关节的位移 d_i 和关节角度 θ_i 即可求得下部修剪机构的姿态和位置。

2)修剪机逆运动学分析。逆运动学分析为已知机器人末端位姿求解各关节的变量,针对该研究即为已知上下部修剪机构的位置和姿态求解各移动关节 d_i 和转动关节角度 θ_i 的值。在本研究中,即为已知 4_0T 和 5_0T 求取相应的关节变量, 4_0T 和 5_0T 为修剪

$${}^1_0T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, {}^2_1T = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 & 140 \\ 0 & 0 & -1 & -d_2 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^3_2T = \begin{bmatrix} \cos \theta_1 & -\sin \theta_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & -420 \\ \sin \theta_1 & \cos \theta_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$${}^4_3T = \begin{bmatrix} \cos \theta_2 & -\sin \theta_2 & 0 & 466.486 \\ \sin \theta_2 & \cos \theta_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

同理,下部修剪机构的D-H参数表和齐次变换矩阵如下:

$${}^1_0T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, {}^2_1T = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 & 140 \\ 0 & 0 & -1 & -d_2 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^3_2T = \begin{bmatrix} \cos \theta_1 & -\sin \theta_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & -420 \\ \sin \theta_1 & \cos \theta_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$${}^5_3T = \begin{bmatrix} \cos \theta_3 & -\sin \theta_3 & 0 & -457.573 \\ \sin \theta_3 & \cos \theta_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

1)修剪机正运动学分析。机器人的正运动学是指在各关节已知的情况下,对末端执行器位置和姿态的求解,对于本研究,即对 4_0T 和 5_0T 进行求解,上部修剪装置的末端位姿正运动学求解如下:

$${}^4_0T = {}^1_0T \cdot {}^2_1T \cdot {}^3_2T \cdot {}^4_3T, \text{ 可求得:}$$

修剪机构的正运动学求解如下式:

机末端执行机构在直角坐标系的位姿矩阵,是一个由可确定末端执行机构空间位置的平移矢量 P 和确定姿态的旋转矢量 n, o, a 齐次变换矩阵,如式(3)所示:

$${}^4_0T = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & P_x \\ n_y & o_y & a_y & P_y \\ n_z & o_z & a_z & P_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

如前文所述,末端执行机构的齐次变换矩阵和基坐标系的转换关系为:

$${}^4_0T = {}^1_0T(d_1) \cdot {}^2_1T(d_2) \cdot {}^3_2T(\theta_1) \cdot {}^4_3T(\theta_2) \quad (4)$$

采用Paul反变换法进行修剪机的运动学逆解计算,依次在式(3)等号两边左乘 $[{}^1_0T(d_1)]^{-1}$,寻找建立等式两边矩阵元素单关节变量的等式,解出该变

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 560 \\ -\sin\theta_1\cos\theta_2 - \cos\theta_1\sin\theta_2 & \sin\theta_1\sin\theta_2 - \cos\theta_1\cos\theta_2 & 0 & -466.486\sin\theta_1 - d_2 \\ \cos\theta_1\cos\theta_2 - \sin\theta_1\sin\theta_2 & -\sin\theta_1\cos\theta_2 - \cos\theta_1\sin\theta_2 & 1 & 466.486\cos\theta_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & P_x \\ n_y & o_y & a_y & P_y \\ n_z & o_z & a_z & P_z - d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

可解得: $P_z - d_1 = 466.486 \cdot \cos\theta_1$

$$\theta_2 = \arctan \frac{n_y}{o_y} - \arccos \frac{P_z}{466.486}$$

$$d_1 = P_z - 466.486 \cdot \cos\theta_1$$

同理可求得: $\theta_1 = \arccos \frac{P_z - d_1}{466.486}$

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 560 \\ -\sin\theta_1\cos\theta_3 - \cos\theta_1\sin\theta_3 & \sin\theta_1\sin\theta_3 - \cos\theta_1\cos\theta_3 & 0 & 457.503\sin\theta_1 - d_2 \\ \cos\theta_1\cos\theta_3 - \sin\theta_1\sin\theta_3 & -\sin\theta_1\cos\theta_3 - \cos\theta_1\sin\theta_3 & 1 & -457.503\cos\theta_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & P_x \\ n_y & o_y & a_y & P_y \\ n_z & o_z & a_z & P_z - d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

可解得: $P_z - d_1 = -457.503 \cdot \cos\theta$

$$d_1 = P_z + 457.503 \cdot \cos\theta_1$$

同理可求得: $\theta_1 = \arccos \frac{P_z - d_2}{457.503}$

$$d_2 = -P_y - 466.486 \sin \left(\arccos \frac{P_z}{457.503} \right)$$

$$\theta_3 = \arctan \frac{n_y}{o_y} - \arccos \frac{P_z}{457.503}$$

在各关节变量限定范围之内理论条件下,修剪机各末端执行器的逆运动学解是唯一的。至此,修剪机逆运动学所需要的各个移动关节和转动关节变量由式(1)~(6)求得,完成修剪机的正逆运动学求解。

3)修剪机工作空间分析。本研究中修剪机工作空间是指修剪机修剪切割线的所有可能位置集合,表示末端执行器在执行修剪任务时的空间覆盖能力,机械臂的工作空间可以直观地表述其完成修剪工作的能力。通常采用蒙特卡洛法在Matlab中对修剪机的末端执行器工作空间进行求解。本研究中末端执行机构为往复式和回转式圆盘切割机构,并非传统工业机器人夹持等末端执行器,因此,在求解回

量,如果未能找到合适的变量,则依次在式(5)等式两边左乘 $[{}^4_3T(\theta_2)]^{-1}$ 、 $[{}^3_2T(\theta_1)]^{-1}$,直到解出所有关节变量,求解上部修剪机构逆运动学解的式子如下所示:

$${}^2_1T \cdot {}^3_2T \cdot {}^4_3T = {}^1_0T^{-1} \cdot {}^4_0T \quad (5)$$

即:

$$d_2 = -P_y - 466.486 \sin \left(\arccos \frac{P_z}{466.486} \right)$$

$$\theta_2 = \arctan \frac{n_y}{o_y} - \arccos \frac{P_z}{466.486}$$

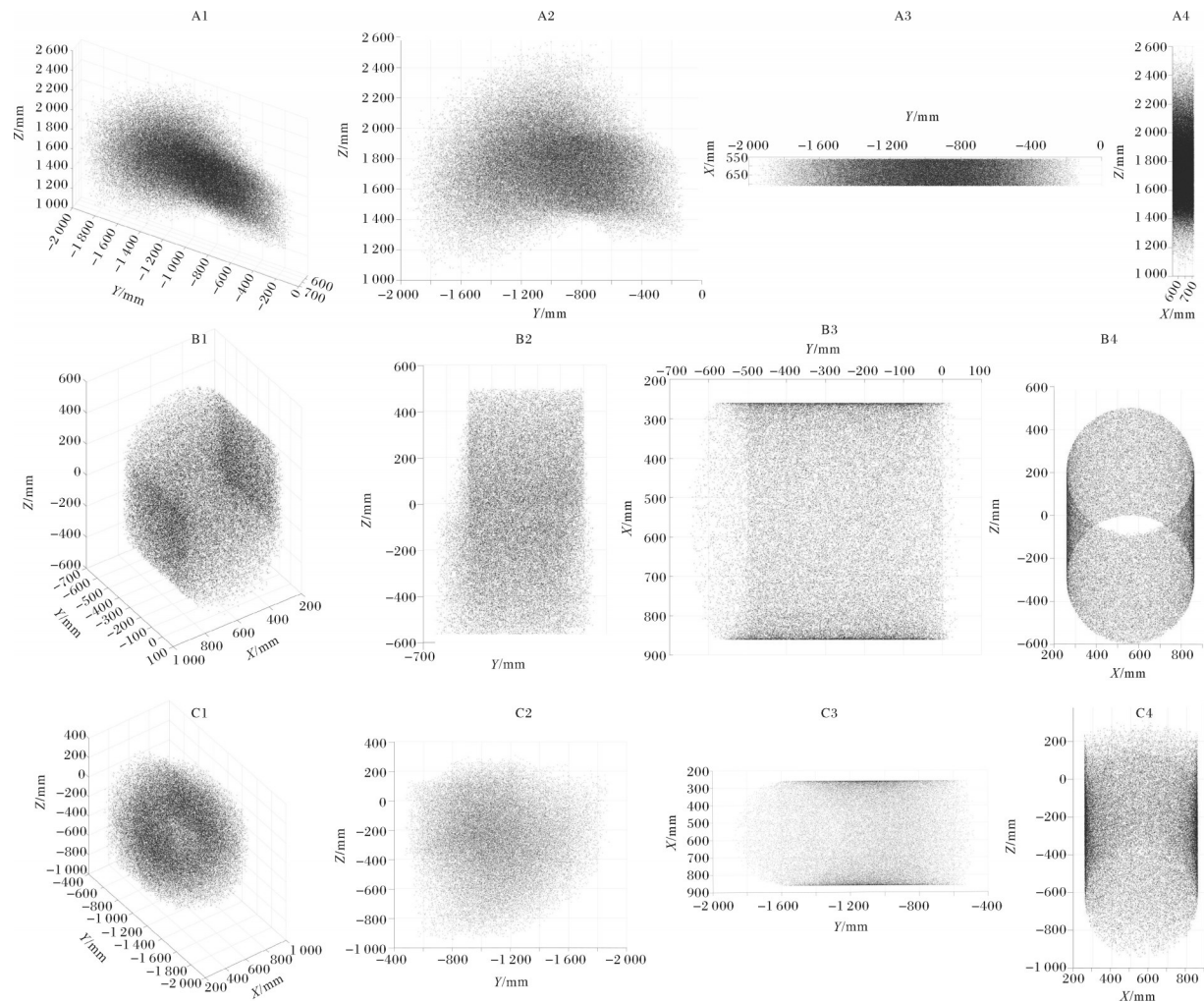
同理,下部修剪机构的逆运动学求解如下式所示:

$${}^2_1T \cdot {}^3_2T \cdot {}^5_3T = {}^1_0T^{-1} \cdot {}^5_0T \quad (6)$$

转式切割机构的时候,在模型中添加一个以回转中心为圆心的回转机构的末端为末端执行器点来代替回转刀盘进行工作空间求解,将刀盘的切割半径定义为参考参数,工作空间中的每个点用刀盘半径表示局部切割线的覆盖范围,求解往复式切割机构时采用平移连杆加末端执行器的方法来拟合刀具实际的工作形式,以切割刀具的有效长度作为参考,计算刀具直线运动范围在空间中的覆盖点。蒙特卡洛法求解工作空间的具体步骤为:(1)对于各个关节变量在各自的变量范围内随机生成1组变量值组合;(2)所获得的变量组值带入式;(3)获得末端执行机构在空间的1组坐标;(4)将步骤(1)和步骤(2)重复N次,N在本研究中取30 000次,将获得的所有点坐标集合在Matalb中绘制作业空间的点云图(图4)。

1.3 果树修剪机远程监控系统设计

1)控制系统总体设计。本研究设计的果树修剪机远程监控系统将分为应用层、网络层、感知层几个方面去实现。传感层主要由2个位移传感器和3个倾角传感器组成,基于多个位移、角度传感器去获取机器的实时位姿信息。控制部分主要是由51单片机和继电器组成,收集并处理传感器的信息,通过网络



A1:上部修剪机构工作空间 Workspace for middle trimmer; A2:主视图 Main view; A3:俯视图 Top view; A4:左视图 Left view; B1:中部修剪机构工作空间 Workspace for bottom trimmer; B2:主视图 Main view; B3:俯视图 Top view; B4:左视图 Left view; C1:下部修剪机构工作空间 Workspace for upper trimmer; C2:主视图 Main view; C3:俯视图 Top view; C4:左视图 Left view.

图4 果树修剪机修剪刀具工作空间点云图

Fig.4 Point cloud of orchard pruning robot pruning tool workspace

层传递信息给终端,同时接受终端给的指令去完成相应的控制。网络层主要由ESP8266模块和思古物联云平台组成^[29],主要作用是使用ESP8266的WiFi模块传递传感器信息到云平台,将数据存在思古物联的服务器中以供手机终端随时查看。手机APP作为上位机,可以实时监测修剪机的工作状态(各关节位姿等),可以人工设置参数发送指令给控制层,按照要求实现果树修剪。

2)传感器选型。为了实时感知修剪机各关节的位置或姿态,考虑到各关节的运动特点和机械臂的实际结构,分别为竖直和水平位移机架选用EG02型拉绳位移传感器,为角度调节机构和上下部末端修剪机构选用SINDT02型倾角传感器用以监测各关节的实时位置和姿态,以及作为后续机械

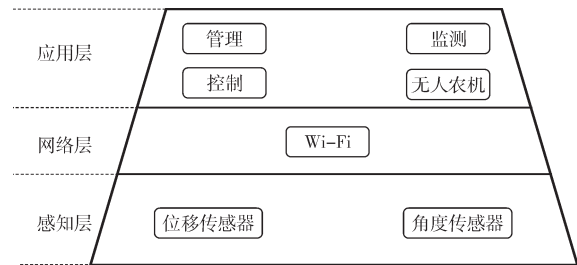


图5 果树修剪机的物联网架构

Fig.5 IoT architecture of orchard pruning robot

臂位姿反馈控制的反馈信号。传感器的安装位置如图6所示,传感器的参数表如表3所示。各传感器与单片机的软件通信采用Modbus协议,硬件连接采用RS-485通信协议,数据交换和控制效果稳定可靠。

3)驱动机构与控制器。驱动机构运动控制的目

表3 传感器参数

Table 3 Sensor parameter list

参数 Parameters	EG02型拉绳式位移 传感器 EG02 type pull cord displace- ment sensor	SINDT02型倾 角传感器 SINDT02 incli- nation sensor
测量范围 Measurement range	0~100 0 mm	X:±180°; Y:±90°
工作电压/V Operating voltage	12~24	5
工作温度/℃ Operating temperature	-10~70	-40~85
输出方式 Output method	MODBUS-RTU	MODBUS-RTU

的是保证修剪机的机械臂各关节按照指令实现精确的位移和角度的调整,准确快速地实现修剪姿态变换,因此,合适的驱动元件是实现自动控制的关键。本研究中,控制各关节的平移和转动皆由液压油缸完成,共5个,以满足柑橘树机械修剪的任务要求,对末端修剪机构采用液压马达作为动力输入驱动修剪机构完成修剪。采用三位四通电磁换向阀4WE6E61B/CG24N9Z5L控制液压油缸换向,液压马达换向用二位四通电磁换向阀4WE6EA61

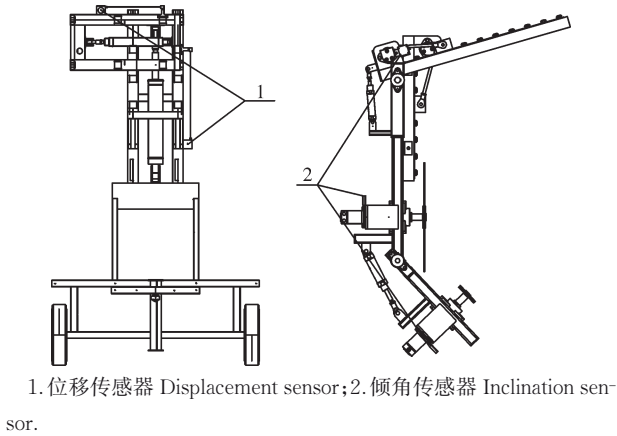
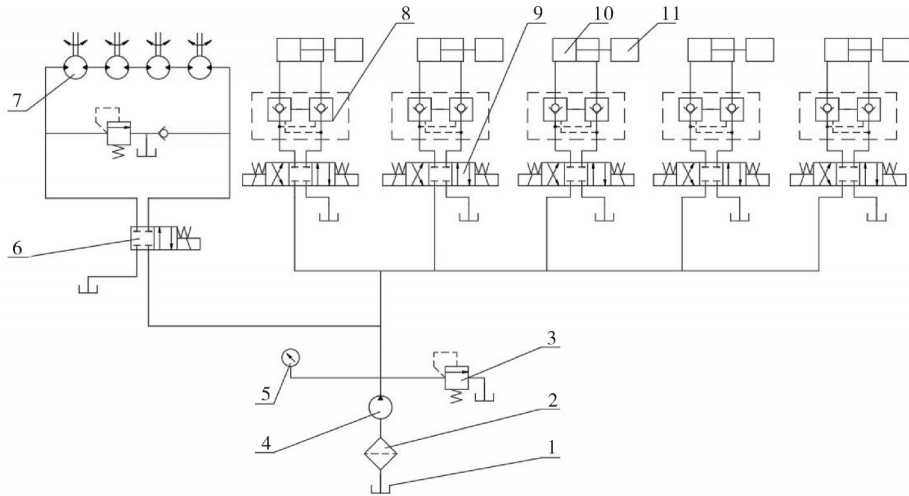


图6 位移传感器/倾角传感器安装位置

Fig.6 Displacement sensor/inclination sensor mounting position

B/CG24N9Z5L控制,该系列的电磁换向阀比其他系列相同通径阀通流能力大,能提高换向和复位的可靠性和使用寿命。根据液压设计手册,结合修剪机工作要求,采用华德液压工业公司生产的WE型电磁换向阀。设计的液压系统原理图如图7所示^[27]。



1. 油箱 Oil tank; 2. 过滤器 Filter; 3. 溢流阀 Relief valve; 4. 动力平台液压泵 Power platform hydraulic pump; 5. 压力表 Pressure gauge; 6. 二位四通电磁换向阀 Two-position four-way electromagnetic reversing valve; 7. 液压马达 Hydraulic motor; 8. 液压锁 Hydraulic lock; 9. 三位四通电磁换向阀 Three-position four-way electromagnetic reversing valve; 10. 液压缸 Hydraulic cylinder; 11. 工作负载 Work load.

图7 液压系统原理图

Fig.7 The diagram of hydraulic system principle

为满足果树修剪机的快速、稳定、精确的控制任务,本研究选用STC89C52单片机作为控制器,其成本低廉、功能稳定,可以满足本研究对控制器的要求,在本研究中,控制器用于实现采集传感器的数据、接收上位机的控制指令、执行位姿控制算法、控制继电器开闭进而实现电磁换向阀和液压马达的开

闭和换向的功能。

4)通信模块设计与实现。ESP8266作为超低功率的UART-Wi-Fi模块,其高效稳定的数据传输和通信能力,使其在物联网领域有着广泛应用,本研究采用ESP8266模块用于云端服务器、手机APP和单片机之间的数据传输和通信功能,进而实现果树修

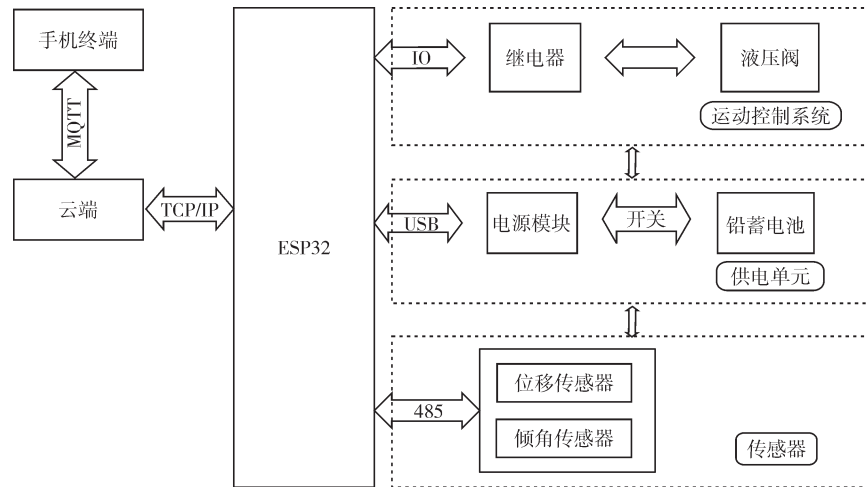


图8 控制系统硬件设计框图

Fig.8 Block diagram of control system hardware design

剪机的人机交互系统中的信息交互和远程控制^[26]。在通信协议的选取中,本研究采用MQTT通信协议实现ESP8266与云端服务器和手机APP之间的数据交换,通过MQTT协议建立与云端服务器之间可靠连接。对于ESP8266和51单片机之间的通信和数据传输,选用UART串行通信协议,配置了波特率、数据位、停止位等通信参数,以确保二者之间数据传输和通信的稳定性和可靠性。

为了实现数据的准确传输和指令的有效执行,设计了合适的JSON数据格式用于数据交换和指令传递。通过定义清晰的数据格式和消息交换机制,ESP8266能够解析和生成JSON格式的数据,实现与云服务器和APP之间的数据交互和指令传递。同时,ESP8266将接收到的数据(JSON格式)进行解析,以提取出有效的信息,并将其转换为51单片机可以理解的格式,如树高、树冠大小等信息,并将其传递给51单片机,从而控制修剪机的液压油缸长度,实现机械臂姿态的控制。同样地,ESP8266还需要能够将51单片机生成的数据转换为JSON格式传输给云服务器,将传感器模块采集到的实时数据通过云服务器传输到APP上,供用户实时监测和查看。至此,完成了ESP8266与云服务器、手机APP和51单片机之间的通信系统的搭建,ESP8266作为通信模块的核心,通过配置网络连接、通信协议和数据交换规则,实现了与云服务器的稳定连接和数据交换,同时通过与51单片机的串口通信,实现了与硬件设备的数据传输和控制。这样的设计使得系统具备了高效、稳定的远程控制和监控能力,为果树修剪机的管理提供了便利和灵活性。

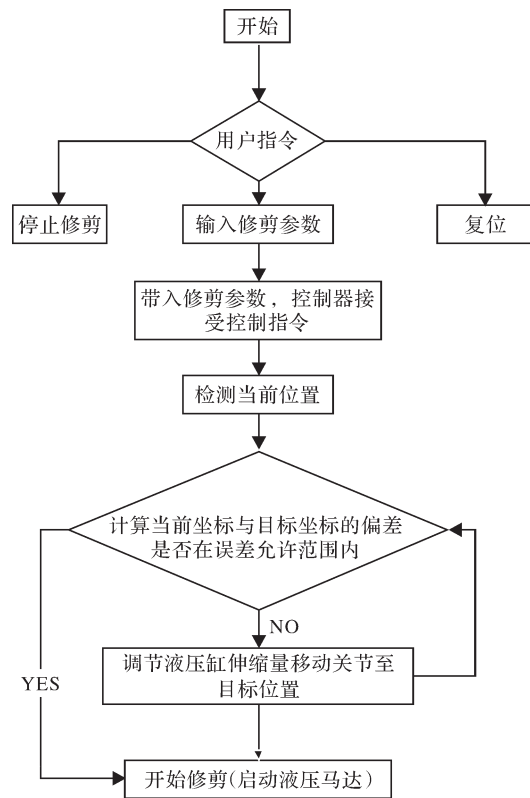


图9 修剪机位姿自适应调整流程图

Fig.9 Flowchart of robot position adaptive adjustment

5)果树修剪机控制流程。修剪机位姿自适应调整控制流程图如图9所示。果树修剪流程为,首先将修剪机由动力平台搭载至离所需修剪果树适当的位置(根据树的品种、大小,修剪机与树干距离设为不同的固定值),之后用户可在手机终端输入3种命令,停止修剪即为液压马达停止工作;复位即为修剪机各关节自动恢复至初始位置(机械臂占用空间最小时各关节的位姿);带参数设置的修剪,单片机接收

用户输入的树形参数(要求修剪树型高度、树型宽度)单片机根据用户输入的树形参数和修剪模式对修剪机进行运动学解算,根据柑橘园艺修剪要求上部修剪角度 θ_2 通常为与水平线成 0° (对应“7”型修剪模式)或 20° (对应“梯形”修剪模式),树形高度可最终经运算对应竖直运动关节调节 d_1 ,树形宽度可最终经运算对应水平运动关节调节 d_2 ,根据树干与地面的夹角可调节 θ_1 来适应树形。求解到达目标树形坐标各关节的位姿($d_1, d_2, \theta_1, \theta_2, \theta_3$)之后,根据各倾角传感器和位移传感器的检测值计算偏差。如果当前各关节的位置坐标与目标坐标的偏差在误差允许范围内,则单片机给控制液压马达的电磁阀启动命令,开始修剪,否则根据偏差启动各相应的电液换向阀,推动液压缸进行各关节的调整直到偏差值在允许范围后开始修剪。结束修剪后,用户根据修剪效果决定下一次的循环是停止修剪、重复修剪或者将修剪机位姿初始化。完成修剪后,修剪机则由动力平台拖动至下一个修剪目标重复以上流程。

1.4 人机交互系统设计

1) 云端服务器模块设计。云服务器在果树修剪机的控制系统中起着实现用户远程访问、控制和监控修剪机械工作状态的重要作用。本研究中云服务器作为中间桥梁,与手机APP和ESP8266模块建立连接,实现二者的数据交换和存储功能,其中ESP8266实时接收修剪机的倾角传感器和位移传感器数据并上传到云服务器中储存在其数据库里,同时云服务器还可以接收手机APP指令(所需修剪的树冠高度、宽幅、切割模式的转换等),并将其解析处理成控制系统所能理解的指令,传输至机械臂控制系统可执行的相应操作。本研究采用思古物联作为云端服务器平台,该平台可提供加密算法对数据传输进行加密,以保证数据的安全性和保密性。此外,用户在使用手机APP与云端服务器进行交互时,需验证身份以保证合法用户才可以实行后续的控制和数据访问,此外,云服务器可设置不同的用户权限以限制其对系统的控制和远程访问,以确保数据和系统的安全性。

2) 手机APP模块设计。采用手机APP作为控制终端可以为用户提供便捷的交互界面和功能体验(图10)。本研究基于控制需要,所开发的手机APP功能涵盖了检测果树修剪机械各关节的位姿、发送工作指令、接收报警通知、记录实时传感器数据,可以有效管理果树修剪作业,方便用户操作和降低劳

动强度,应用Android平台开发框架,以实现友好的用户兼容性。作业时手机APP可以实现:对传感器数据进行监测、发送控制指令调节修剪机的关节和执行机构的位姿、记录修剪机的历史动作数据。



图10 用户手机软件界面

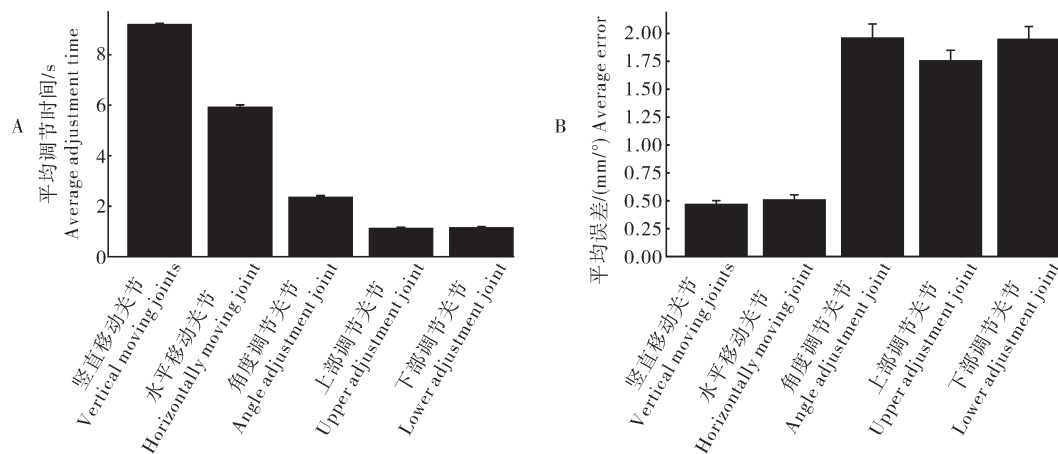
Fig.10 User cell phone software interface

2 结果与分析

于2023年12月2日在华中农业大学农业农村部柑橘全程机械化科研基地进行样机测试,测试该远程控制方案的调节时间、准确性,调节时间的衡量指标为果树修剪机每个关节从初始位置(各液压缸伸长量为0)运动至目标位置的调节时间,准确性的衡量指标为给定各关节不同控制目标,修剪机各关节最终到达的实际位置与目标位置的误差。

调节时间的测试:记录各液压缸从初始位置经手机下达控制指令运动至目标位置所需的时间,并再次返回至初始位置,进行3次试验以求取平均值,其中,各液压缸运动至目标位置伸长量为:竖直移动油缸350 mm、水平移动油缸200 mm、角度调节油缸100 mm、上部调节油缸50 mm、下部调节油缸50 mm;通过手机软件对各传感器的检测模块记录各传感器的数值,计算各关节控制的准确性,对每个关节取5个不同的数值记录每次控制的准确性,之后计算平均误差来量化控制方案的准确性。试验结果如图11所示。

液压回路设计和液压缸的运动方向不同会导致最终位置和目标位置出现偏大或者偏小的误差,表现为准确性测试中的误差正负值。控制各关节运动的各液压油缸都是并联,控制竖直移动和水平移动关节的液压缸较大,运动平稳,能更为精确和稳定地



A:不同关节液压缸控制调节时间 Adjustment time for different joint; B:不同关节控制精度 Accuracy for different joint.

图11 样机试验结果

Fig.11 Prototype test result

到达目标值,角度调整关节和上下部修剪关节由于液压缸较小,液压回路里的大流量液压油冲击惯性较大,会导致油缸在到达设定的误差范围之前产生一定的冲击和震荡,进而导致控制误差相较于大油缸控制的关节偏大,后期可以通过在震荡较大的回路中增加节流阀、流量控制阀或者溢流阀来解决相应问题,各关节在控制响应时,总体运动平稳,无大幅度和高频率震荡。此外,在控制过程中信号传输稳定可靠,无通信中断现象出现。由以上数据分析可得,果树修剪机的控制方案响应速度和控制精度可以达到实际应用需求。

3 讨论

本研究设计实现了一种基于物联网技术的果树修剪机的远程控制系统,可根据用户需求通过所开发的手机APP实现对果树修剪机的远程监控。建立了果树修剪机的运动学方程,基于Matlab Robotics Toolbox求解了修剪机的运动位姿,通过点面转化将往复式修剪机构和回转式修剪机构以末端执行器的形式在Matlab中表现出来,并基于蒙特卡洛法实现了对各个修剪机构工作空间的求解。建立了完整的果树修剪机物联网系统,分别对其感知层、网络层和应用层进行了设计和选型,完成了手机用户界面的设计,实现了基于ESP8266的手机APP-云服务器-单片机通信。进行了果树修剪机样机远程控制的快速性和准确性试验,试验结果表明其关节运动和工作空间与理论求解一致,且具有良好的稳定性、快速性和准确性,具有实际应用价值。未来实际应用中,需进一步考虑在复杂多变的果园环境下信号遮挡、

干扰因素可能导致的通信不稳定问题。因此,未来研究可考虑融合多传感器数据融合技术,采用更多鲁棒性强的通信协议,以提高系统在复杂环境下的适应性和可靠性。

参考文献 References

- [1] 郭文武,叶俊丽,邓秀新.新中国果树科学研究70年:柑橘[J].果树学报,2019,36(10):1264-1272.GUO W W, YE J L, DENG X X. Fruit scientific research in new China in the past 70 years citrus[J]. Journal of fruit science, 2019, 36(10): 1264-1272(in Chinese with English abstract).
- [2] 潘一凡,刘永忠,黄钰轩,等.我国柑橘栽培管理技术现状调查和发展思考[J].华中农业大学学报,2023,42(4):140-149. PAN Y F, LIU Y Z, HUANG Y X, et al. Investigation and development thinking on the cultivation situation and management techniques of citrus in China[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2023, 42(4): 140-149 (in Chinese with English abstract).
- [3] 张世璠.不同夏季修剪方式对柑橘树体生长和果实品质的影响[D].武汉:华中农业大学,2022.ZHANG S J. Effects of different summer pruning methods on citrus tree growth and fruit quality [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2022 (in Chinese with English abstract).
- [4] 聂娟,孙瑞志,邓雪峰,等.基于数据世系管理的精准农业不确定性复杂事件处理[J].农业机械学报,2016,47(5):245-253. NIE J, SUN R Z, DENG X F, et al. Uncertain complex event processing in precision agriculture based on data provenance management [J]. Transactions of the CSAM, 2016, 47(5): 245-253(in Chinese with English abstract).
- [5] 贺英豪,唐德钊,倪铭,等.基于改进YOLOv5对果园环境中李的识别[J].华中农业大学学报,2024,43(5):31-40. HE Y H, TANG D Z, NI M, et al. Recognizing plums in orchard environment based on improved YOLOv5[J]. Journal of Huazhong

- Agricultural University, 2024, 43(5): 31-40 (in Chinese with English abstract).
- [6] 聂娟,孙瑞志,曹振丽,等.精准农业信息物理融合系统的事件模型研究[J].农业机械学报,2015,46(1):285-291. NIE J, SUN R Z, CAO Z L, et al. Preliminary study on event model in cyber-physical systems for precision agriculture[J]. Transactions of the CSAM, 2015, 46(1): 285-291 (in Chinese with English abstract).
- [7] 汪凤珠,张俊宁,李瑞川,等.花生联合收获机作业在线监测与故障预警系统研究[J].农业机械学报,2015,46(S1):69-73. WANG F Z, ZHANG J N, LI R C, et al. Design of on-line monitoring and fault early warning system for peanut combined harvester[J]. Transactions of the CSAM, 2015, 46(S1): 69-73 (in Chinese with English abstract).
- [8] ATZORI L, IERA A, MORABITO G. The Internet of Things: a survey[J]. Computer networks, 2010, 54(15): 2787-2805.
- [9] 李想,王建仑,高红菊.面向农田物联网复杂事件处理的时空事件模型[J].农业机械学报,2015,46(S1):153-161. LI X, WANG J L, GAO H J. Time and space event model for complex event processing in Internet of Things in farmland[J]. Transactions of the CSAM, 2015, 46(S1): 153-161 (in Chinese with English abstract).
- [10] GUBBI J, BUYYA R, MARUSIC S, et al. Internet of Things (IoT): a vision, architectural elements, and future directions[J]. Future generation computer systems, 2013, 29(7): 1645-1660.
- [11] 赵继政,庄蒲宁,石富磊,等.基于物联网技术的奶牛瘤胃pH值和温度监测系统研究[J].农业机械学报,2022,53(2):291-298. ZHAO J Z, ZHUANG P N, SHI F L, et al. Design and experiment of rumen pH value and temperature monitoring system for dairy cows based on Internet of Things[J]. Transactions of the CSAM, 2022, 53(2): 291-298 (in Chinese with English abstract).
- [12] 潘云飞,周艳,何磊,等.果园管理阶段修剪机械的研究进展[J].农机化研究,2023,45(7):261-268. PAN Y F, ZHOU Y, HE L, et al. Research progress of orchard pruning machine[J]. Journal of agricultural mechanization research, 2023, 45(7): 261-268 (in Chinese with English abstract).
- [13] SPAGAOLO F. Rotary blade pruning machine: AU, US6250056B1[P]. 2001-06-26.
- [14] SPAGAOLO F. Pruning machine: AU, US6523337B2[P]. 2003-02-25.
- [15] KALJACA D, VROEGINDEWEIJ B, VAN HENTEN E. Coverage trajectory planning for a bush trimming robot arm[J]. Journal of field robotics, 2020, 37(2): 283-308.
- [16] 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 (ICRA). May 31-August 31, 2020. Paris, France: IEEE, 2020: 7050-7056.
- [17] MONTA M, KONDO N, SHIBANO Y. Agricultural robot in grape production system[C]//Proceedings of 1995 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Nagoya, Japan: IEEE, 1995: 2504-2509.
- [18] TUIJL B V, TIELEN A P M, MENCARELLI A, et al. Structured design of a novel end-effector for a bush trimming robot[C]//Proceedings of the European Conference on Agricultural Engineering AgEng2018. Wageningen: Wageningen University & Research, 2018: 188-196.
- [19] VAN MARREWIJK B M, VROEGINDEWEIJ B A, GENÉ-MOLA J, et al. Evaluation of a boxwood topiary trimming robot[J]. Biosystems engineering, 2022, 214: 11-27.
- [20] WANG M, WU G P, FAN F, et al. Dynamic network topology control of branch-trimming robot for transmission lines[J/OL]. Electronics, 2019, 8(5): 549 [2024-12-24]. <https://doi.org/10.3390/electronics8050549>.
- [21] 黄良玉,吴功平,吴俊峰.架空线路走廊树枝切割机器人研究[J].机床与液压,2022,50(9):19-23. HUANG L Y, WU G P, WU J F. Research on branch cutting robot for overhead line corridor[J]. Machine tool & hydraulics, 2022, 50(9): 19-23 (in Chinese with English abstract).
- [22] 李扬,杜帅,陈宝林,等.高枝修剪机姿态协调控制与精准锯切定位[J].农业工程学报,2017,33(10):40-48. LI Y, DU S, CHEN B L, et al. Attitude coordination control and accurately sawing-positioning of high-branch pruning machine[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(10): 40-48 (in Chinese with English abstract).
- [23] WATANABE D, SUZUKI R, USUKI T. Synthesis of desmosine-d4: improvement of isotopic purity by D-H exchange of amino groups[J]. Tetrahedron letters, 2017, 58(12): 1194-1197.
- [24] PAVILLO D, FEICHTENHOFER C, AULI M, et al. Modeling human motion with quaternion-based neural networks[J]. International journal of computer vision, 2020, 128(4): 855-872.
- [25] ZHANG J, SHAN Z D, REN Y X. The analysis of PPP- δ robot workspace based on boundary search method[J]. Applied mechanics and materials, 2014, 536/537: 984-988.
- [26] 王克奇,张维昊,罗泽,等.击打式松果采摘机器人设计与试验[J].农业机械学报,2020,51(8):26-33. WANG K Q, ZHANG W H, LUO Z, et al. Design and experiment of hitting pine cone picking robot[J]. Transactions of the CSAM, 2020, 51(8): 26-33 (in Chinese with English abstract).
- [27] 杨娇.丘陵地区柑橘树修剪机的设计与试验[D].武汉:华中农业大学,2023. YANG J. Design and experiment of citrus tree pruners in hilly areas[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2023 (in Chinese with English abstract).
- [28] 陈辉龙.丘陵山地果园履带动力平台设计与试验[D].武汉:

- 华中农业大学, 2024. CHEN H L. Design and test of crawler power platform for hilly and mountainous orchards [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2024 (in Chinese with English abstract).
- [29] DWIVEDI M D, KALRA S, DUBEY J, et al. Smart farming: monitoring of field status and control of irrigation using sensors and Esp8266 nodemcu module[J/OL]. Journal of physics: conference series, 2023, 2570 (1): 012035 [2024-12-24]. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/2570/1/012035>.

Design and experiment of the remote-control system for fruit tree pruners

HUANG Shuo^{1,2,3}, YANG Fang^{1,2,3}, SHEN Yijun¹, ZENG Lang¹,
HE Shihao¹, PAN Haibing^{1,2,3}, LI Shanjun^{1,2,3}

1. College of Engineering, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China;

2. Ministry of Agriculture and Rural Affairs Key Laboratory of Agricultural Equipment in Mid-Lower Yangtze River, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China;

3. Ministry of Agriculture and Rural Affairs Citrus Mechanization Research Base, Wuhan 430070, China

Abstract A remote-control system for fruit tree pruners was designed based on the Internet of Things (IoTs) and electro-hydraulic driving architecture to solve the problems of the low level of automation in the process of pruning fruit tree. The control system for fruit tree pruners was mainly consisted of a hydraulic drive module, a main control module, a communication module, a perception module, and a human-phone interaction module to complete the monitoring and remote control of the joint position of the pruner and cooperate with the start-stop of the hydraulic motor to complete the tasks of mechanical pruning of fruit trees. The improved Denavit-Hartenberg (D-H) parameter method was used to establish the kinematic model of fruit tree pruner. The kinematic model of pruner was verified with Matlab Robotics Toolbox, and the theoretical workspace of each pruning mechanism was solved with Monte Carlo algorithm. The specific sensors, controllers and hydraulic valves were selected according to the characteristics of joint motion to design an application layer control scheme for the IoTs system. The network layer of the IoTs system was established based on the UART-Wi-Fi module ESP8266 to realize remote monitoring and communication between the mobile phone APP-cloud server-pruner. A mobile phone APP with human-phone interaction interface for the convenience of easy use and quick start was designed to enable the reading of the joint positional status of the pruner and the sending of control instructions through the human-phone interaction interface to automatically adjust the position of pruner. A experiment at an open area for viewing the rapidity and accuracy of the machine prototype was conducted. The results of testing the prototype showed that the positioning errors of the mobile joints were within ± 0.5 mm, the positioning error of each rotating joint was less than 2° , and the control and adjustment time of each joint motion to the limit stroke was between 1.14-9.21 s, with good adjustment time. It is indicated that the fruit tree pruner based on the IoTs architecture has a high degree of automation and a simple mode of operation, and has certain application value in practically pruning fruit trees.

Keywords pruning fruit trees; robot kinematics; internet of things (IoTs); D-H methods; remote control

(责任编辑:陆文昌)