

# 基于 SLAM 的采摘机器人机械臂自动化控制系统设计

张 燕,何书凡

(西安外事学院 工学院,西安 710077)

**摘要:**为应对采摘机器人的高效采摘作业需求,该文设计基于SLAM的采摘机器人机械臂自动化控制系统。将激光雷达传感器搭载于采摘机器人中,感知采摘机器人的环境数据。利用SLAM方法,定位采样点,创建采摘机器人采摘作业的栅格地图,将环境数据感知结果与所构建的栅格地图对齐匹配。利用最小二乘法,求解采摘机器人机械臂的最优位姿,确定对应的机械臂关节移动路径作为目标路径。利用PID控制器自动化控制采摘机器人的机械臂关节,使采摘机器人的机械臂各关节依据目标采摘路径移动。系统测试结果表明,该系统能实现采摘机器人机械臂的自动化控制,机械臂各关节跟踪目标轨迹的跟踪误差控制在 $0.2^{\circ}$ 以下。

**关键词:**SLAM;采摘机器人;机械臂;自动化控制系统;PID

**中图分类号:**TP242

**文献标识码:**A

**文章编号:**1001-9944(2024)08-0054-03

## Design of Automatic Control System for Picking Robot Mechanical Arm Based on SLAM

ZHANG Yan, HE Shufan

(School of Engineering, Xi'an International University, Xi'an 710077, China)

**Abstract:**To meet the efficient harvesting requirements of harvesting robots, a SLAM based mechanical arm automation control system is designed. Install lidar sensors in the harvesting robot to sense the environmental data of the harvesting robot. Using the SLAM method, locate the sampling points, create a grid map of the harvesting robot's harvesting operations, and align and match the environmental data perception results with the constructed grid map. Using the least squares method, solve the optimal pose of the harvesting robot's mechanical arm and determine the corresponding joint movement path of the mechanical arm as the target path. Using PID controller to automatically control the joints of the mechanical arm of the harvesting robot, so that each joint of the mechanical arm moves according to the target harvesting path. The system test results show that the system can achieve automatic control of the harvesting robot's mechanical arm, and the tracking error of the mechanical arm's joint tracking target trajectory is controlled below  $0.2^{\circ}$ .

**Key words:**SLAM; picking robot; mechanical arm; automation control system; PID

农业自动化通过SLAM技术实现采摘机器人的精准定位和导航,为果园、蔬菜园等场景提供自动化、智能化采摘支持<sup>[1-4]</sup>。SLAM技术结合传感器和机器人运动数据,实时感知环境并构建地图,使机

器人能在复杂环境自主导航<sup>[5]</sup>。结合机器视觉和机械臂控制,采摘机器人能自主识别、抓取农作物,适应不同种类和生长状态,提高生产效率并降低成本。

文献[6]将计算机视觉和卷积神经网络应用于

收稿日期:2024-03-04;修订日期:2024-06-19

基金项目:陕西省“十四五”教育科学规划2023年度课题项目(SGH23Y2892)

作者简介:张燕(1978—),女,硕士,高级工程师,研究方向为机器人工程、工业设计;何书凡(2003—),男,本科,研究方向为机器人工程。

采摘机器人机械臂控制<sup>[6]</sup>,提升奇异果采摘的准确度。然而,果园环境的复杂性,如光照不足和图像模糊,会影响识别效果,降低采摘准确度。强化学习算法在复杂环境下可能不稳定,影响机械臂的跟踪性能。因此,本文设计基于 SLAM 的采摘机器人机械臂自动化控制系统,实现目标识别和采摘,推动农业自动化技术的发展和应用。

## 1 采摘机器人机械臂自动化控制系统

### 1.1 采摘机器人机械臂的动力学模型

采摘机器人机械臂刚体动力学方程的一般形式表达式如下:

$$\mathbf{A}(q)\ddot{q}+\mathbf{C}(q,\dot{q})+\mathbf{B}(q)=\boldsymbol{\tau} \quad (1)$$

式中: $\mathbf{A}(q)\ddot{q}$ 与 $\mathbf{A}(q)$ 分别为机械臂受到的惯性力及惯性矩阵; $\mathbf{B}(q)$ 与 $\mathbf{C}(q,\dot{q})$ 分别为机械臂受到的重力大小以及离心力与科氏力矩阵; $\boldsymbol{\tau}$ 为机械臂的关节力矩输入矩阵。

将 $\mathbf{C}(q,\dot{q})$ 拆分为 $\frac{1}{2}\dot{\mathbf{A}}(q)\dot{q}$ 与 $\mathbf{B}(q,\dot{q})\dot{q}$ ,公式为

$$\mathbf{A}(q)\ddot{q}+\left(\frac{1}{2}\dot{\mathbf{A}}(q)+\mathbf{D}(q,\dot{q})\right)\dot{q}+\mathbf{B}(q)=\boldsymbol{\tau} \quad (2)$$

式中: $\mathbf{D}(q,\dot{q})$ 为斜对称矩阵,且 $\mathbf{x}^T\mathbf{D}(q,\dot{q})\mathbf{x}=0$ 。

### 1.2 基于 SLAM 采摘机器人机械臂采摘路径

基于动力学模型,利用 SLAM 确定采摘机器人机械臂的采摘路径和期望位姿。激光雷达传感器实现环境同步定位,构建增量式地图。构建栅格地图,通过双三次插值法离散化处理环境信息。匹配实时环境与地图,求解最优位姿,并映射处理不同分辨率的激光点云信息,避免局部最小值。

#### 1.2.1 构建采摘机器人采摘环境的栅格地图

利用栅格地图将采摘机器人的采摘环境,划分为多个相同尺寸的栅格,利用 0 与 1 表示该栅格状态为被障碍物占据及未被障碍物占据。 $(x+i,y+j)$ 为激光雷达传感器的采样点坐标,利用双三次插值法对激光雷达传感器采样点周围临近点像素值,进行加权平均处理,获取实际像素值。用 $R(x)$ 表示双三次插值的基函数,公式为

$$R(x)=\begin{cases} (\alpha+1)x^3-(\alpha+2)x^2+1, & x\leq 1 \\ \alpha x^2(x-4)+6\alpha x-2\alpha, & 1<x<2 \\ 0, & x\geq 2 \end{cases} \quad (3)$$

式中: $\alpha$ 为待定系数。

通过对采样点进行双三次插值运算,获取采摘机器人机械臂采摘路径的采样点像素值 $f(x+i,y+j)$ 。

#### 1.2.2 采摘机器人采摘环境栅格地图的扫描匹配

完成采摘机器人机械臂采摘路径的栅格地图构建后,利用激光雷达传感器采集的实时数据与所构建的栅格地图进行匹配处理,采摘机器人障碍物信息关联如下:

(1)利用激光雷达传感器感知采摘机器人的采摘环境信息,构建时间为 $T$ 与 $T+1$ 的障碍物链表。

(2)采用最近邻法配对时间 $T$ 与 $T+1$ 时的障碍物链表,两障碍物节点坐标 $(x_g,y_g)$ 间距小于设置阈值时,完成障碍物匹配。

(3)构建周期为 $T+2$ 的障碍物链表,将该周期障碍物与临时存储区障碍物配对。

#### 1.2.3 确定采摘机器人机械臂的关节移动路径

完成采摘机器人采摘环境的栅格地图构建后,利用最小二乘法,求解采摘机器人机械臂最优位姿的公式为

$$\mu^*=\arg\min_{\mu}\sum_{q=1}^n[1-M(Z_q(\mu))]^2 \quad (4)$$

$$Z_q(\mu)=\begin{bmatrix} \cos\gamma & -\sin\gamma \\ \sin\gamma & \cos\gamma \end{bmatrix}\begin{bmatrix} Z_{q,x} \\ Z_{q,y} \end{bmatrix}+\begin{bmatrix} P_x \\ P_y \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中: $Z_q(\mu)$ 为采摘机器人在世界坐标系中位置; $\mu=[P_x \ P_y \ \gamma]^T$ 与 $M(Z_q(\mu))$ 为采摘机器人的初始位姿及栅格内存在障碍物的概率; $P_x$ 与 $P_y$ 为机器人的横坐标与纵坐标; $\gamma$ 与 $Z_q(\mu)$ 为机器人机械臂的旋转角度及世界坐标系的机器人位置; $Z_{q,x}$ 与 $Z_{q,y}$ 为激光雷达坐标系中激光点的位置坐标。

机器人在当前时刻与初始时刻的位姿存在 $\mu+\Delta\mu=\mu^*$ 关系,其中 $\mu^*$ 与 $\mu$ 分别为当前时刻及初始时刻的采摘机器人的位置。

### 1.3 基于 PID 的采摘机器人机械臂自动化控制

采用 PID 控制器,线性控制采摘机器人机械臂各关节的移动,自动化控制结构图如图 1 所示。为控制采摘机器人沿期望轨迹移动,设置位移函数调控机械臂关节位移。通过伺服电机和微分方式,将采摘轨迹转换为位移函数。结合位移传感器函数与该函数,实现采摘机器人自动化轨迹控制。

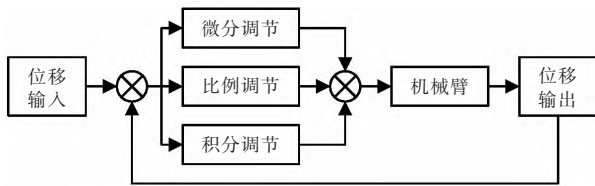


图1 机械臂自动化控制结构图

Fig.1 Structure diagram of mechanical arm automation control

## 2 系统测试

将采摘机器人应用于某农场的番茄采摘作业中。本文系统利用 SLAM 方法,构建采摘机器人的番茄采摘作业应用中的栅格地图,并对各栅格状态标注。

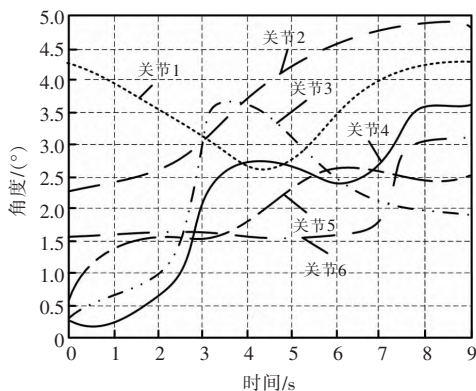
采用 SLAM 方法,采摘机器人执行番茄采摘作业地图的误差统计,如表 1 所示。采用 SLAM 方法构建采摘地图,SLAM 测量值与实测值相差较小,采摘地图的相对误差低于 0.5%。本文系统针对采摘机器人机械臂采摘应用构建的地图,有较高的建图精度,可为采摘机器人机械臂的控制提供依据。

表 1 建图误差统计结果

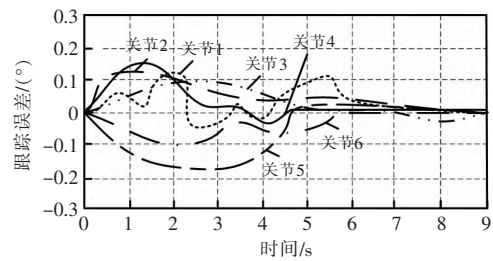
Tab.1 Statistical results of mapping errors

路径序号	实测值/m	SLAM 测量值/m	误差/m	相对误差/%
1	38.45	38.34	0.11	0.29
2	35.54	35.49	0.05	0.17
3	28.46	28.51	0.05	0.18
4	18.54	18.62	0.08	0.43
5	16.97	17.04	0.07	0.41
6	15.87	15.91	0.04	0.25
7	17.56	17.63	0.07	0.40

本文系统利用 SLAM 法规划机械臂采摘轨迹后,利用 PID 控制算法控制机械臂执行采摘,如图 2 所示。机械臂各关节运行轨迹与目标轨迹紧密跟随,跟踪误差小于  $0.2^{\circ}$ 。证明系统可有效控制机械臂



(a) 关节运行轨迹



(b) 关节跟踪误差

图2 机械臂关节跟踪情况

Fig.2 Joint tracking of mechanical arm

沿期望轨迹采摘,提升采摘性能。

采用本文系统自动化控制采摘机器人机械臂,统计采摘机器人的采摘作业轨迹,统计结果如图 3 所示。从图 3 可看出,采用本文系统自动化控制采摘机器人机械臂,机器人能沿着期望轨迹,移动至采摘目标即终点,成功采摘目标。实验验证了本文系统对采摘机器人机械臂的控制效果。

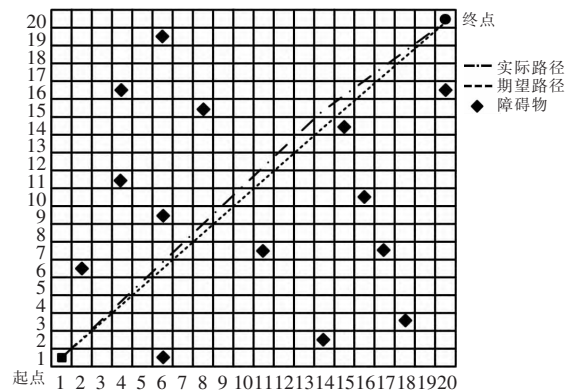


图3 采摘机器人采摘轨迹

Fig.3 Picking trajectory of picking robot

设置无障碍、少量障碍、大量障碍 3 种不同的采摘环境进行 50 次测试,结果如表 2 所示。由表 2 可以看出,机械臂移动与期望路径相近,验证了本文系统自动化控制性能高,系统可适应不同环境,满足采摘需求,采摘效果理想。

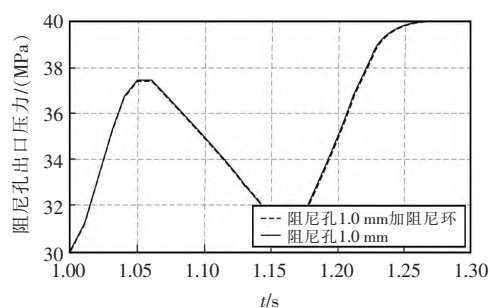
表 2 采摘机器人运行结果

Tab.2 Operation results of picking robot

测试参数	无障碍物	少量障碍物	大量障碍物
最优路径长度/m	25.34	28.42	32.58
实际路径长度/m	25.43	28.37	32.14

## 3 结语

SLAM 技术的运用,为采摘机器人在复杂多变的农田作业环境中,提供自主导航和 (下转第 77 页)



(b) 阻尼孔出口压力

图 8 仿真分析结果

Fig.8 Simulation analysis results

### 2.3 传感器试验验证

通过 AMESim 对压力传感器的仿真只是定性分析了阻尼结构对传感器流量和压力的影响趋势。改进后的传感器性能指标是否满足要求还需要通过实际测试。传感器增加的阻尼结构,一般不会影响传感器的零位、满量程、精度等静态性能指标,但有可能会影响到传感器的动态响应指标。而动态响应是传感器的重要指标,直接反映了液压系统的测量精度、运行效率和稳定性。改进前后的压力传感器具体测试结果如表 1 所示。

表 1 技术指标测试对比情况

Tab.1 Comparison of technical indicators testing

序号	指标要求	改进前测试指标	改进后测试指标
1	零位输出 ( $0.5 \pm 0.03$ )V	0.495 V~0.504 V	0.497 V~0.502 V
2	上限输出 ( $4.5 \pm 0.03$ )V	4.483 V~4.513 V	4.483 V~4.508 V
3	精度 $\leq 0.25\%$ FS	0.048%FS~0.088%FS	0.045%FS~0.082%FS
4	动态: 幅值比( $1 \pm 0.02$ ) 相位滞后不大于 $3^\circ$	0.989~1.012 -0.6°~2.6°	0.983~1.014 0.3°~1.4°
5	整机冲击试验	传感器膜片撕裂 传感器失效	波纹膜片完好 传感器正常

(上接第 56 页)精准定位的能力,提高采摘效率和准确性。SLAM 技术通过实时感知和构建环境地图,使采摘机器人能自主地探索农田,根据地图信息规划最优采摘路径。通过机械臂运动轨迹和力度的控制,机器人能抓取和采摘农作物,避免人为造成的损失和浪费。采摘机器人机械臂自动化控制系统有望在未来应用于果园、蔬菜园等农业生产,实现农业生产的自动化和智能化。

#### 参考文献:

[1] 阎应红.柑桔机械化和机器人采收研发现状与展望[J].中国南方

由表 1 可知,改进后的传感器性能指标与改进前基本无变化。另外,通过伺服系统整机测试,传感器可以满足整机的测试要求,传感器很好地测量了伺服系统的压力变化,并且通过了伺服系统压力冲击的寿命试验考核。试验结束后,通过解刨更改后的压力传感器,观察到压力敏感芯体的波纹膜片无任何凹陷破损,从而说明传感器耐冲击设计改进可行且有效。

### 3 结语

综上所述,通过 AMESim 软件对硅压阻式压力传感器的阻尼结构的定性仿真分析,以及对传感器进行实际的定量测试,结果表明,增加的阻尼结构的压力传感器了不仅减缓系统的瞬间压力冲击,并且抵挡住压力对波纹膜片中间的直接冲击,从而有效保护压力敏感芯体的波纹膜片。因此,改进后的传感器提高了硅压阻压力传感器的耐冲击性和可靠性,很好地满足了伺服系统的冲击试验的测试需求。

#### 参考文献:

- [1] 张颖英,邓勇生,刘涛,等.硅压阻压力传感器优化设计[J].物联网技术,2019,9(8):24~25+27.
- [2] 王成龙,邱志伟,曾庆良,等.基于模拟退火算法的多孔式液压缓冲器阻尼孔优化[J].液压与气动,2019(4):54~59.
- [3] 王传礼,魏本柱,邓海顺,等.基于 AMESim 卸荷溢流阀阻尼孔优化分析[J].机床与液压,2017,45(5):104~107.
- [4] 刘志政,赵继云,戚厚宝,等.水介质阻尼孔流动特性试验研究[J].机床与液压,2012,40(3):26~27.
- [5] 文小燕.矿用压力传感器的工台特性研究[J].现代工业经济和信  
息化,2016(21):33~34.
- [6] 金映丽,贾伟.基于 AMESim 的油压缓冲器仿真与研究[J].重型机械,2021(4):88~90.

果树,2023,52(2):203~209.

- [2] 潘小鹏,刘浩敏,方铭,等.基于语义概率预测的动态场景单目视觉 SLAM[J].中国图象图形学报,2023,28(7):2151~2166.
- [3] 冯青春,赵春江,李涛,等.苹果四臂采摘机器人系统设计与试验[J].农业工程学报,2023,39(13):25~33.
- [4] 康占武,张志成.基于数控轻量化的采摘机器人控制系统研究[J].农机化研究,2022,44(11):119~122+130.
- [5] 金玉成,高杨,刘继展,等.采摘机器人深度视觉伺服手-眼协调规划研究[J].农业机械学报,2021,52(6):18~25+42.
- [6] 冯硕,李旗.奇异果采摘机器人机械臂控制系统研究—基于计算机视觉和卷积神经网络[J].农机化研究,2022,44(10):25~29.