DOI: 10.12398/j.issn.2096-7217.2026.01.004

基于视觉融合与GNSS的苹果采摘机器人自主导航系统设计与试验

问仕威[1], 葛亚豪[1], 贾炯龙[1], 卫乃硕[1], 陈雨[1, 2], 陈军[1, 2*]

(1. 西北农林科技大学机械与电子工程学院,陕西杨凌,712100;
2. 陕西省农业装备工程技术研究中心,陕西杨凌,712100)

摘要:中国作为全球主要的苹果生产国,面临着劳动力成本上升和人口结构变化所带来的农业用工紧张问题,推动果园作业向自动化、智能化转型已成为提升农业效率的关键因素。针对标准化栽培模式下的苹果果园环境,设计并实现一种基于全球导航卫星系统(GNSS)与视觉融合导航的自动导航系统。该系统采用阿克曼轮式底盘,集成前轮转角检测与自动转向控制模块。为提升系统在复杂果园场景中的适应能力,提出了一种基于点云数据、GNSS精度与路径偏差等关键参数的导航模式动态切换策略,实现视觉导航与GNSS导航之间的动态转换,使其能够满足不同作业区域对导航精度的需求。在路径规划方面,构建了结合梭式套行模式与三阶贝塞尔曲线的全覆盖导航路径:行间路径通过双目视觉点云的滤波、下采样与线性拟合提取导航中心线,地头路径通过果园几何参数生成贝塞尔曲线轨迹,以优化换行转弯路径,减少冗余行驶距离。田间试验结果显示,系统在不同行驶速度下均实现高精度路径跟踪,最小横向偏差为0.052 m;地头换行中跨两行与跨一行导航平均偏差分别为0.052 m与0.066 m,满足实际作业精度要求。综上所述,研究提出的导航系统具有良好的环境适应性与导航精度,为果园自动化作业装备的工程化应用提供有力支撑。

关键词:视觉融合导航;梭式套行全局路径规划;苹果采摘机器人;标准化果园;导航模式动态切换策略

中图分类号:S224.3 **文献标识码:**A **文章编号:**2096-7217(2026)01-0031-12

问仕威, 葛亚豪, 贾炯龙, 卫乃硕, 陈雨, 陈军. 基于视觉融合与GNSS的苹果采摘机器人自主导航系统设计与试验[J]. 智能化农业装备学报(中英文), 2026, 7(1): 31-42

WEN Shiwei, GE Yahao, JIA Jionglong, WEI Naishuo, CHEN Yu, CHEN Jun. Design and experiment of autonomous navigation system for apple picking robot based on visual fusion and GNSS [J]. Journal of Intelligent Agricultural Mechanization, 2026, 7(1): 31-42

0 引言

随着我国人口老龄化加剧与农村劳动力减少,而苹果作为我国栽培面积最广、产量最高的经济果树,其生产与采摘对人力高度依赖[1-2]。近年来,农业机器人技术进展显著,但果树的密集分布与树冠遮挡对信号构成严重干扰,制约了基于单一传感器导航系统的鲁棒性与定位精度[3-4]。多传感器融合成为提升导航系统稳定性的有效手段[5-6]。黄沛琛[7]构建了一种融合机器视觉与全球卫星导航系统(global navigation satellite system,GNSS)的履带式果园机器人导航系统,提出了路径识别、行尾检测和地头转向方法,该系统可实现果树行间的精准导航与稳定转向。李雪峰[8]提出了一种融合GNSS与激光里程计的导航避障策略,采用广义ICP(GICP)算法优化定位精度,结合PID路径跟踪与人工势场法实现动态避障。该系统最大横向偏差不超过8 cm,平均偏差控制在3 cm以内,具备较高的导航精度。然而,前述研究集中于果园局部路径的规划,且在地头转向环节未能实现导航模式的及时切换,难以适应作业场景的连续性。

为此,结合GNSS与视觉传感器在不同场景下的感知优势,提出了一种适用于苹果采摘机器人导航的全覆盖路径规划方法。同时,设计了一种基于作业区域动态识别的导航模式切换机制,确保机器人在果园行间与地头转向等多种作业场景下实现高精度自主导航。

1 果园路径规划

全局覆盖路径是根据果园种植模式及导航作业需

收稿日期:2025-06-13 修回日期:2025-07-27
基金项目:陕西省科学技术厅项目(32272001);国家重点研发计划项目子课题(2022YFD1900304)
第一作者:问仕威,男,2000年生,山西太原人,硕士研究生;研究方向为智能农业装备设计与控制。E-mail: wsw142301@nwafu.edu.cn
*通信作者:陈军,男,1970年生,宁夏固原人,博士,教授,博导;研究方向为智能农业装备设计与控制。E-mail: chenjun_jdxy@nwsuaf.edu.cn

求所规划的最优路线,其评价指标包括路径长度最短、避免遗漏与重复覆盖等[9]。为确保苹果采摘机器人全局路径规划的有效性,除满足上述基本要求外,还需结合机器人的作业特性,保证路径的连续性与转弯的曲率平滑性。

基于此,本研究提出的全局路径规划需满足以下3个条件:(1)苹果采摘机器人处于理想导航环境,不考虑外界干扰因素的影响;(2)受阿克曼轮式底盘的转向半径和果园行距限制,机器人在换行转向时至少需跨越一行树行;(3)机器人所搭载的采摘机械臂为单侧作业,因此每一树行必须进行两次导航作业以完成两侧采摘。

1.1 果园地图构建

在开展全局路径规划前,需构建果园导航地图模型,以获取空间布局信息与关键农艺参数,为路径规划算法提供基础数据支撑。本研究使用手持式打点仪在果园作业区域内对关键位置进行采样,依次在第一行行头、行末和第二行行头设置采样点P_1、P_2和P_3,并测量地头宽度和行距等农艺参数,以获取果园导航环境的基本空间信息。基于果园行列分布、作业边界以及机器人作业范围,构建包含作业区域边界、果树行位置信息等要素的果园地图模型。

1.2 梭式套行路径规划方法

为提高路径跟踪精度与导航系统整体性能,同时降低路径重复率,针对苹果采摘机器人作业特性及果园的种植模式,设计了一种适用于标准化果园的“梭式套行”路径规划方法,如图1所示。该方法具有起点设置灵活、路径连接顺畅等优势,可有效减少地头倒车次数,减轻车轮局部磨损,适用于规则及轻度不规则果园环境。

果园路径规划包括行间路径和地头换行路径两部分。为避免在地头频繁倒车调整位姿并提高作业效率,所设计的梭式套行路径规划方法如下:以第1行为初始采摘行,机器人沿行进方向采摘左侧果实;到达行末后,直接跨越1行进入第3行,逆向采摘右侧果实;继续以此方式跨行进入第5行,逆向采摘左侧果实。完成采摘后,机器人再跨越3行返回第1行,采摘其右侧果实;随后依次进入第3行和第5行,采摘对应未作业一侧的果实。完成奇数行后,机器人跨越2行进入第2行,采摘左侧果实,按类似模式依次完成偶数行采摘任务,实现对1、3、5、2、4、6等全部树行的全覆盖作业。

该方法不仅实现了果园区域的无遗漏采摘,显著降低了地头倒车调整的频率,还减少了路径冗余,提升了整体作业效率。综上,果园全局路径规划可进一步细化为行间路径规划与地头路径规划,本文将在后续章节中分别展开详细探讨。

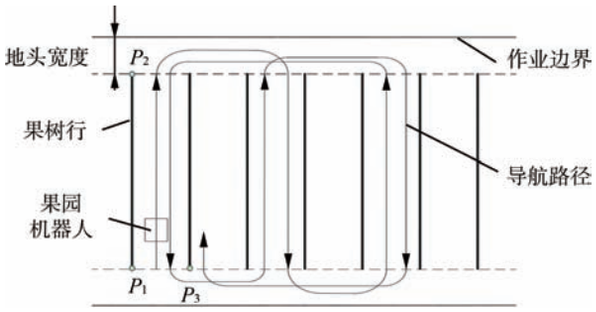


图1 果园梭式套行路径规划示意图

Figure 1 Orchard path planning diagram

1.3 行间路径规划

本研究在陕西省宝鸡市凤翔区雨嘉果业果园利用搭载于轮式底盘的ZED2双目相机采集果树行间的三维点云数据,数据采集过程如图2所示。为提取具备实时性与结构特征的有效信息,原始点云依次经过直通滤波、体素降采样、统计滤波及地面平面拟合处理,完成预处理操作。随后,将处理后的三维点云投影至二维平面,并基于RANSAC算法对左右两侧果树行的点云分别进行线性拟合,从而提取出用于导航控制的实时目标路径线。



图2 果树行间数据采集过程

Figure 2 Data acquisition process between rows of fruit trees

1.3.1 ROI提取

在原始点云数据中,如图3(a)所示,靠近设备区域通常点云密度较高,但也伴随大量噪声与冗余信息;而远离设备的区域则存在点云稀疏、质量下降等问题,难以为路径提取提供稳定支持。此外,高空区域常包含来自天空背景的干扰点,若不进行预处理,将对后续导航基准线的拟合造成负面影响。

为有效剔除无效点,提高点云数据的质量,在点云预处理过程中引入直通滤波算法(pass-through filter)。该方法具有线性时间复杂度,满足农业环境中对点云数据处理效率与精度的双重要求。其核心是基于空间坐标轴设定阈值范围,仅保留落入指定感兴趣区域(ROI)内的点云数据。因此,分别在x轴,y轴

和z轴建立独立的直通滤波器，分别设定上下限为$(x_{\min}, x_{\max})$，$(y_{\min}, y_{\max})$和$(z_{\min}, z_{\max})$，此时，$p_{\text{ptf}}=\left\{p_i \middle| x_{\min}\leqslant x\leqslant x_{\max}\cap y_{\min}\leqslant y\leqslant y_{\max}\cap z_{\min}\leqslant z\leqslant z_{\max}\right\}$。

滤波器参数优化方案采用动态阈值调整机制，结合作业实际情况，在数据采集时相机安装高度为1.0 m，底盘承载平台高度为0.5 m，搭载采摘机械臂后机器人总高度为1.9 m，因此将(－1.0, 0.9)作为z轴感兴趣区域；在x轴方向取5 m范围内点云用于导航线拟合，在保留机器人底盘前方树行特征的同时减小计算量；在y轴方向，通过参数调整发现2.2 m外包含较多行外数据，影响路径提取。

最终确定最优参数域x轴为(0,5)、y轴为(－2.2, 2.2)、z轴为(－1.0,0.9)，直通滤波提取ROI后点云如图3(b)所示，点云数量由2 073 600减少到846 126个，减少了约59%，滤波后区域点云密度标准差降低48.2%。

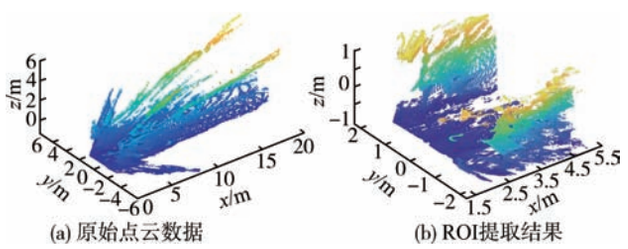


图3　原始点云数据及ROI提取结果

Figure 3　Original point cloud data and ROI extraction results

1.3.2　基于随机采样一致性算法移除地面点云

在完成ROI提取后，尽管点云数据量得到了显著压缩，但残留的地面点云仍对后续导航目标线的提取造成较大干扰。因此，有必要进一步剔除地面点云，以提高点云数据的可靠性。然而，果园地形存在一定坡度起伏并非理想的平面，若采用依赖固定高度阈值的滤波方法将难以准确区分地面与非地面点，从而导致误删或漏删。

为解决上述问题，本研究引入基于随机采样一致性(random sample consensus, RANSAC)算法的地面平面拟合方法，对地面点云进行建模与剔除。该方法通过随机采样点云数据拟合平面方程，迭代优化模型参数，以最大化拟合内点数量，从而提取与地面相符的点云数据并剔除其他干扰信息。考虑到果园场景中普遍存在如树干等竖直结构物，若不加限制，RANSAC拟合过程可能会将这些垂直面误识为地面。为此，在拟合过程中引入法向量方向约束，确保所提取平面具有近似水平的朝向，以增强地面识别的准确性。

采用该方法处理后的点云可视化结果如图4所示，处理前点云总量为846 126个，剔除地面点云后减少至456 854个，数据量减少约46%。该预处理过程有效滤除了地面与杂草等低矮植被所造成的干扰点，仅保留了位于左右两侧果树行的结构化点云。法向量约束策略进一步提升了平面识别的可靠性，有效避免了将树干或其他非水平结构误识为地面。该方法显著提升了点云数据的质量，为果园自主导航系统提供了更为可靠的环境感知基础。

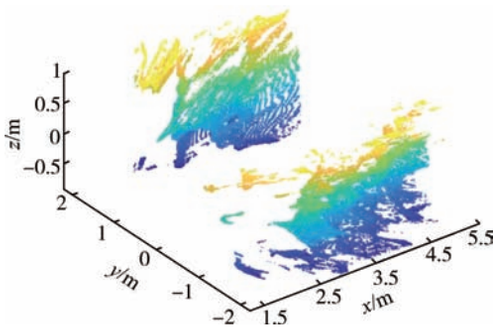


图4　地面点云去除结果

Figure 4　Ground point cloud removal results

1.3.3　点云数据压缩与噪声优化处理方法

降采样处理与点云统计滤波图如图5所示。

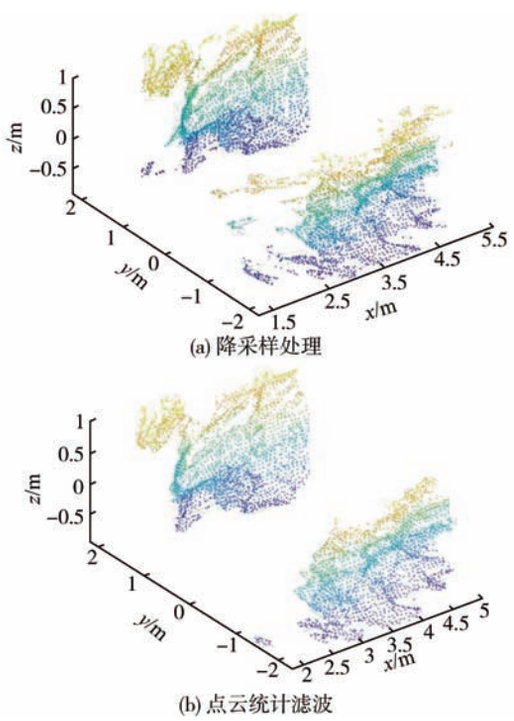


图5　降采样处理与点云统计滤波

Figure 5　Downsampling processing and point cloud statistical filtering

尽管地面点云已被有效剔除，但果树区域的点云仍较为稠密，若直接用于后续处理算法，将显著增加计算负担，影响系统的实时性。为提高点云处理效率，本研究对地面去除后的点云应用体素网格降采样(voxel grid downsampling)算法，以在保留果树行主要结构特

征的同时,显著减少点云数量,降低计算复杂度。处理结果显示,单帧点云数据量由 456 854 个减少至 8 487 个,降幅约为 98%。如图 5(a)所示,降采样后的点云仍完整保留了果树行的基本形态,满足导航路径提取所需的结构特征要求。

由于传感器噪声、局部遮挡及测量误差的存在,降采样后的点云中仍包含一定数量的离群点与异常噪声点。这些点可能对果树行的直线拟合产生干扰,降低后续算法的精度与鲁棒性。为进一步提升点云质量,本文在降采样基础上引入统计滤波(statistical outlier removal, SOR)算法,对降采样点云进行异常点剔除处理。统计滤波方法是基于点云中每个点的邻域距离分布,剔除偏离统计特征的异常点。处理结果显示,点云数量由 8 487 个减少至 6 005 个,约减少 30%。如图 5(b)所示,经统计滤波处理后,点云分布更加集中、规整,离群点与由传感器误差引起的噪声点被有效清除。优化后的点云清晰地展现出左右两侧果树行的结构特征,为后续 RANSAC 直线拟合提供了高质量的输入数据,进一步提高了导航路径提取的精度与稳定性。

1.3.4 导航线拟合

为提取果树行的导航路径,将处理后的三维点云沿 xy 平面投影为二维数据,并沿 y 轴方向分为左右两侧点集 S_L 和 S_R。采用 RANSAC 算法分别进行直线拟合,随机采样两点以构建直线方程,如式(1)所示。

$$\frac{x-x_0}{m}=\frac{y-y_0}{n}=\frac{z-z_0}{p} \tag{1}$$

式中:(x_0, y_0, z_0)——样本中某一拟合点的三维坐标;

(m, n, p)——直线在 x、y、z 方向上的延伸方向。

最终,通过拟合左右两侧点云并取其斜率与截距的平均,得到导航路径的中线模型,如式(2)所示。

$$y_{nav}=\frac{k_L+k_R}{2}x+\frac{b_L+b_R}{2} \tag{2}$$

式中:k_L——左侧拟合斜率;

k_R——右侧拟合斜率;

b_L——左侧拟合截距;

b_R——右侧拟合截距。

该中线可作为自动导航系统的目标轨迹,确保位于果树行之间的正中位置。如图 6 所示,展示了基于 RANSAC 方法提取导航路径的拟合结果。图中蓝色点表示原始左侧点云数据、粉色点表示原始右侧点云数据,通过 RANSAC 算法分别拟合出左右两侧果树行的边界直线,其中红色和绿色线条分别表示左侧直线和右侧直线拟合结果,通过两条拟合线的中点构成了导航中心线(图中虚线)。由此可见,拟合结果与实际果树行分布良好对齐,导航线在两行之间具有良好的对称性和连续性。说明该方法在处理噪声点干扰及非理想数据条件下仍具有良好的鲁棒性与准确性。

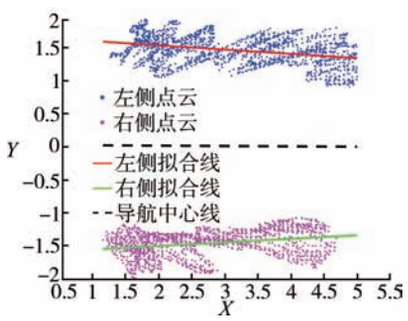


图 6 导航线提取结果

Figure 6 Navigation line extraction results

1.4 地头路径规划

在果园作业过程中,苹果采摘机器人沿预设路径在行间往返执行作业任务,当导航系统引导农业机器人行驶至地头区域时,需在有限的作业空间内完成调头与转向动作。贝塞尔曲线作为一种具备良好连续性和平滑特性的轨迹生成方法,因其在曲率连续性、路径可控性与运动平稳性方面的优势,被广泛应用于农业机器人路径规划[10]。

为保障路径的平滑性与导航系统的稳定性,采用基于 GNSS 控制点与三阶贝塞尔曲线组合的方法对地头路径进行建模与规划。路径由 4 个控制点 P_0、P_1、P_2 和 P_3 决定,其中 P_0 表示转向的起始位置;P_1 和 P_2 为路径生成过程中的控制点,主要用于控制路径的转向形态与曲率过渡;P_3 为转向结束位置。各控制点坐标通过 GNSS 测量获取,初始点 P_0 与控制点 P_1 在 x 轴方向设定偏移距离 d_1=0.7 m,终点 P_3 与控制点 P_2 的偏移距离为 d_2=0.5 m。地头边界处的转向角依据车辆当前姿态和任务规划自动计算,用于限定贝塞尔曲线的起始方向,确保路径与作业行连续过渡。其路径结构如图 7 所示。

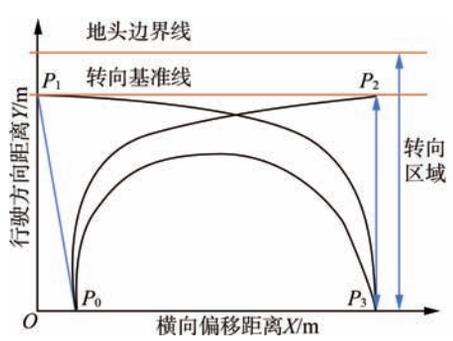
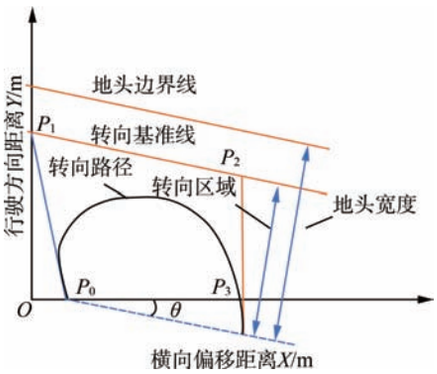


图 7 基于三阶贝塞尔曲线的换行路径示意图

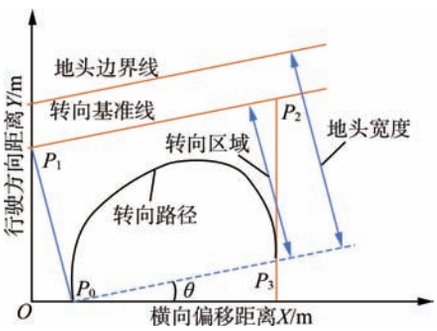
Figure 7 Steering path diagram based on the third-order Bessel curve

该建模方法生成的转向路径具备几何连续性和平滑过渡特性,能够有效连接当前作业行与目标行。曲

线起点与终点的转向方向始终保持一致，避免了方向跳变，增强了路径可控性与导航稳定性[11]。同时，通过曲率变化的调节，转向路径可适配不同转弯半径，满足多样化地头空间条件，斜率转向轨迹如图8所示。



(a) 斜率为正时的转向轨迹



(b) 斜率为负时的转向轨迹

图8　斜率转向轨迹

Figure 8　Slope transition trajectory

在地头边界线存在斜率变化的场景中，只需对P_1、P_2控制点进行微调，即可生成满足边界方向约束的平滑路径。地头转向过程中曲率的平稳过渡对于苹果采摘机器人的路径跟踪精度和运动稳定性具有关键影响。若曲率变化剧烈，易引起速度突变和轮胎侧滑，导致路径偏离并降低控制精度。为验证基于三阶贝塞尔曲线的地头转向路径在导航性能上的优势，本研究对该方法与传统U形转向路径进行了对比分析。

设定相同的转向起点P_0=(0, 0)和转向结束点P_3=(7, 0)，对于基于贝塞尔曲线转向路径，设定d_1=1 m、d_2=6 m分别生成贝塞尔曲线转向路径和U型转向路径，结果如图9所示，贝塞尔曲线路径在整个路径参数区间上的曲率变化呈连续光滑曲线，最大曲率点出现在转向初段后，随后逐渐回落，整体变化平稳。相比之下，U形路径的曲率在直线段与圆弧段连接处存在明显突变，曲率从零陡然跳变为常数，随后又骤降回零，导致机器人在切换路径时需要突然调整转向角度，易引发轮胎侧滑和路径跟踪误差。

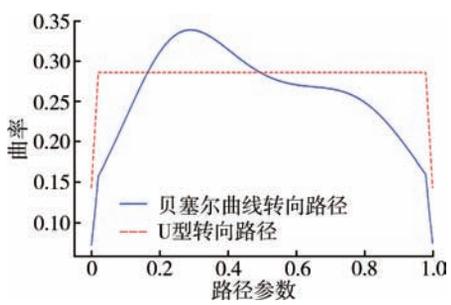


图9　曲率变化对比图

Figure 9　Comparison of curvature changes

基于三阶贝塞尔曲线的地头转向路径规划在曲率变化、导航控制和路径优化等方面均优于传统U形转向路径，其具体对比如表1所示，曲率连续性的提升直接增强了路径的可控性与跟踪精度，特别是在地头空间有限、需要小转弯半径过渡的果园场景中，贝塞尔曲线更能适应动态转向要求[12]。

表1　基于三阶贝塞尔曲线的地头转向路径规划对比表

Table 1　Comparison table of ground turning path planning based on third-order Bessel curve

对比项	传统U形转向路径	基于三阶贝塞尔曲线的转向路径
曲率变化	曲率突变	曲率连续，转向平稳
路径长度	受固定半径约束，路径较长	通过优化控制点布局，可缩短转向路径
计算量	需频繁调整转向角度，控制复杂	导航控制计算量较低，适用于实时控制
地头宽度需求	需要较大地头空间完成转向	可在较小地头完成转向，提高利用率
适应性	固定半径圆弧，难以适应不同地形	可动态调整控制点，提高环境适应性

2　导航模式动态切换策略

果园机器人在复杂作业环境中运行时，为确保路径规划精度与导航过程的稳定性，需根据作业场景动态切换导航模式。结合ZED2双目相机与GNSS模块的特性，构建了一种基于点云密度变化与GNSS定位精度的组合判断策略，用于实现果树行间路径导航与地头转向路径导航之间的自适应切换，从而保障机器人在果园作业过程中的连续性与稳定性。

2.1　果园行末特征分析

在果树行内，机器人默认采用相机导航模式。当其接近地头区域并准备执行转向任务时，需切换至

GNSS导航模式完成转向作业。因此,路径切换的关键在于准确判断机器人是否到达行末区域。为此,以相机采集的点云数量作为主要判断依据,并将其数量变化趋势作为特征指标。

在底盘由行间导航区域驶入地头换行区域的过程中,导航系统持续获取并处理点云信息,并实时记录各帧点云数量。图10展示了这一过程中点云数量的变化:在“行间导航区”内,点云数量保持基本稳定,仅在某一数值附近出现轻微波动;而当机器人逐渐接近地头,即由行中段过渡至行末区域时,由于果树行在视觉视场中逐渐消失,点云数量开始呈现显著下降。进一步提取距行末50 cm至10 cm范围内的点云数据进行单独分析,结果表明该区段点云数量的变化与图中标注的特征位置相吻合。由于该区段正好对应机器人执行掉头操作的关键区域(即掉头执行区),因此可将其作为导航状态切换的有效依据。

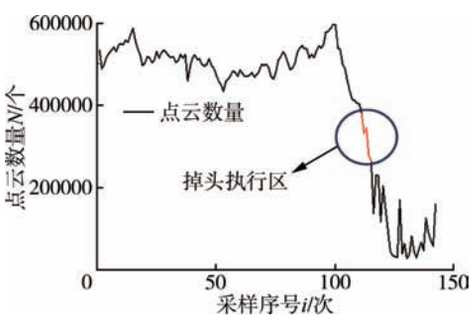


图10 点云数量变化图

Figure 10 Changes in the number of point clouds

为进一步验证该特征的有效性,本研究选取果园中5行不同区域的数据进行统计分析,分别计算每行的行间导航区与行末转向区的点云数量均值,结果如表2所示。5组样本中,行末转向区点云数量较行间区域平均减少37%,其所占比率分别为62.87%、61.77%、62.41%、62.18%和59.62%,说明该特征具有良好的规律性与可辨识性。

表2 点云数量统计表

Table 2 Statistical table of point cloud number

序号	行间导航区/个	行末转向区/个	所占比例/%
1	507 695	319 152	62.87
2	493 578	304 875	61.77
3	513 687	320 574	62.41
4	512 573	318135	62.18
5	509 614	298 724	59.62

当机器人检测到当前帧的点云数量持续低于该阈值,即可判定其处于以下两种状态之一:

1)机器人已进入行末地头换行区域;

2)机器人仍处于行间,果树前方两侧树行缺失。

为提高切换判断的鲁棒性,本研究进一步引入GNSS定位模式作为辅助判断条件。GNSS接收器向上位机传输的字符串数据中包含经纬度、速度、航向角与定位模式等字段,其中第9位表示定位模式。当该值为6时,表示处于RTK固定解状态,具备高精度导航能力。试验证明,在地头换行起点附近测得GNSS均处于RTK固定解状态,因此可将点云数量、GNSS模式与机器人距转向路径起点的距离构建为三重判据,用于导航模式切换。

2.2 导航模式切换算法设计

基于上述分析,设计了导航路径动态切换算法,其流程如图11所示。

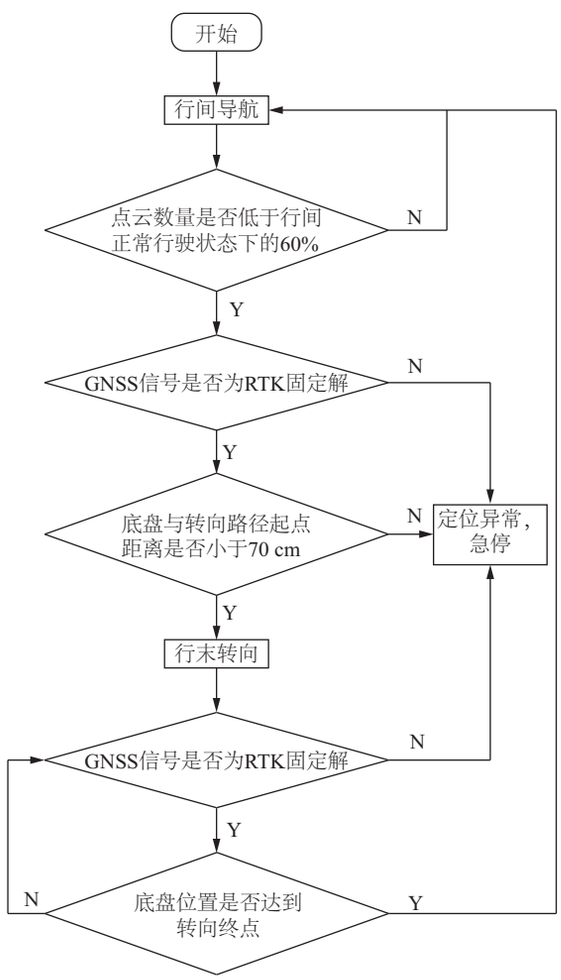


图11 导航路径切换算法流程图

Figure 11 Navigation path switching algorithm flow chart

机器人在果树行间默认采用相机导航模式,ZED2双目相机采集前方环境的三维点云数据,结合滤波与RANSAC拟合提取导航基准线,实现稳定的行间路径跟踪。当机器人行驶至地头区域时,需切换至GNSS导航模式以完成高精度转向。导航模式的切换由以下3项条件联合判定:

1)点云数据减少至设定阈值：点云数量相较于行间正常行驶状态减少至60%及以下；

2)GNSS定位模式：定位模式处于为RTK固定解状态；

3)与地头转向路径的接近度：当前位置与预设三维贝塞尔曲线转向路径的起点(第一个索引点)之间的距离小于70 cm。

当上述条件同时满足时，系统将从相机导航模式切换至GNSS导航模式，进入地头转向阶段。

当机器人完成地头转向系统需判断是否切换回相机导航模式，以恢复行间自主导航。具体切换条件如下：

1)当前位置到达贝塞尔曲线的终点导航索引点；

2)点云数据高于设定阈值，表明机器人已重新进入果树行间。

若在任意时刻出现以下异常情形：点云数量持续低于设定阈值、GNSS定位精度不满足RTK要求，或机器人偏离转向路径起点超过设定距离，则系统将触发紧急停止机制，防止机器人失控偏离路径。系统在此状态下暂停机器人的任何动作，等待人工干预或重新获取高精度导航信息。

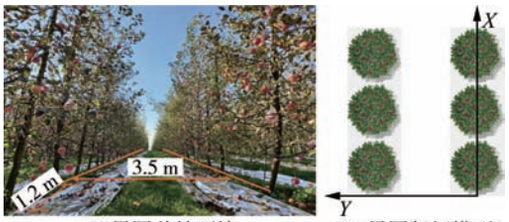
综上所述，基于相机与GNSS融合的导航路径动态切换策略可有效提升机器人在行间与地头作业环境下的适应性。相机导航模式依赖点云实现高精度路径跟踪，适用于果树行间自主行驶；GNSS导航模式则保障机器人在转向阶段的稳定定位与路径控制，二者配合实现果园机器人全流程导航的智能切换与运行可靠性。

3　移动底盘的设计

3.1　整体方案设计

本研究在中国陕西省宝鸡市凤翔区雨嘉果业果园进行现场农艺参数采集，果树种植行距为3.5 m，株距为1.2 m，行间普遍种植白三叶草等覆盖植物以抑制杂草生长，见图12(a)。基于实测数据，构建了标准化果园行间通行模型，见图12(b)。测量结果显示，果树冠横向展开宽度为0.8 m±0.1 m，行间可通行的安全宽度约为1.7～2.1 m。

考虑导航跟踪误差及机械臂作业空间的需求，轮式底盘主体设计尺寸确定为长1.6 m、宽1.1 m、高0.5 m。轮式底盘系统包括驱动模块、转向模块、轮速检测模块、前轮转角检测模块、环境感知模块、控制与通信模块、电源模块以及软件控制系统。整体系统以传感器采集环境信息，主控制器(PC端)解析后向下位机发送控制指令，由电机驱动器控制电机转动，实现底盘按预定轨迹运动，如图13所示。



(a) 果园种植环境　(b) 果园行间模型

图12　果园环境

Figure 12　Orchard environment

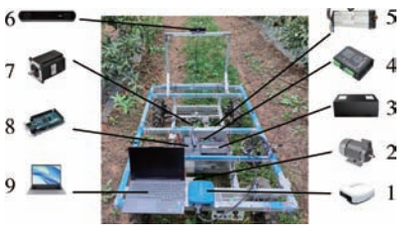


图13　自动导航轮式底盘实物图

Figure 13　Automatic navigation wheel chassis physical map

1. MC5　2. 驱动电机　3. 48V电源　4. 转向电机驱动器　5. 驱动电机控制器　6. ZED2双目相机　7. 转向电机　8. 下位机控制器　9. 主控制器

上位机采用配置为英特尔第十三代i5-13500H(最高主频4.7 GHz)处理器的PC机，运行Ubuntu 18.04 LTS操作系统，内存容量为16 GB。软件架构基于ROS(robot operating system)平台，负责集成GNSS与立体视觉数据的获取与融合，实现果园环境下的自主导航。

下位机以Arduino控制器为核心，主要负责编码器数据采集、上位机控制指令接收以及运动状态的实时反馈。控制流程通过串口通信完成，Arduino接收上位机发送的目标前轮转角与后轮速度，并控制相应执行机构，保障机器人在果树行间稳定运行。整体采摘机器人如图14所示。



图14　采摘机器人整机图

Figure 14　Overall diagram of the harvesting robot

3.2　自动转向系统设计

本研究底盘转向系统采用阿克曼转向机构，由方向机、转向电机和转向机构组成。方向机用于将转向

电机的旋转运动转换为推杆的移动,从而使前轮方向改变,方向机与转向电机之间通过万向节联轴器连接。转向时电机输出轴旋转运动通过万向联轴器后经方向机转换为方向机输出轴的线性移动,从而带动底盘前桥双摇杆机构往复摆动从而实现前轮转动[13-14],如图15所示。

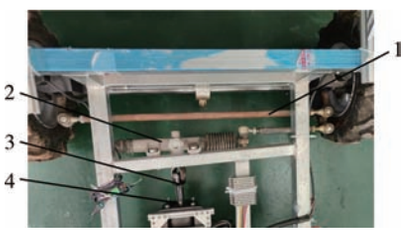


图15 转向机构传动图

Figure 15 Transmission diagram of steering mechanism

1. 双摇杆转向机构 2. 方向机 3. 万向连轴器 4. 步进电机

前轮转角检测模块主要负责实时采集车辆行驶过程中前轮的转向角度信息。通过安装在前轮部位的角度传感器,该模块能够持续监测车辆转向的实际角度,并将测量数据发送至嵌入式下位机,以实现导航系统的闭环控制,从而使车辆前轮的转向角度与预期值相一致。绝对值编码器的安装位置如图16所示。

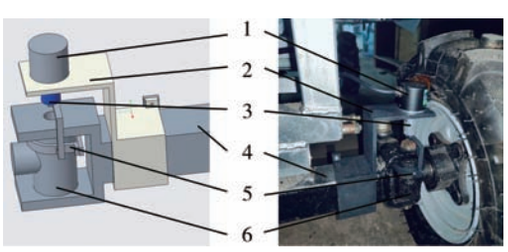


图16 编码器安装示意图

Figure 16 Encoder installation diagram

1. 绝对值编码器 2. 编码器安装支架 3. 联轴器 4. 底盘前桥 5. 传动杆 6. 前轮转动轴

电控式自动转向系统的功能是通过串口接收主控制器的控制指令和绝对值编码器测量得到的前轮转角数据并进行处理,完成后向电机驱动器发送脉冲信号,驱动器控制电机转动,通过方向机传动实现前轮转向控制[15]。当主控制器通过环境定位信息计算出目标前轮转角后通过串口发送给下位机,下位机在接收目标前轮转角的同时通过编码器实时读取实际前轮转角,将其差值作为控制误差输入PID控制器中计算得到控制输出后转换为脉冲传输给步进电机驱动器,实现前轮转角闭环控制。

自动转向控制程序的输入量为目标角度值和当前角度值,目标角度值由主控制器通过定位信息得到,当前角度值由绝对值编码器测量得到,输出量改为电机转速,Arduino接收控制信号后先根据前轮转角极限值和测量的当前角度值判断是否发送信号使电机转动,若当前角度值大于等于前轮极限转角则令步进电机停止转动从而起到过载保护作用,若当前角度值小于前轮极限转角则控制前轮在阈值范围内进行转动。

3.3 底盘电控系统设计

底盘电控系统结构如图17所示。在果园地头区域,由于无遮挡环境保障了良好的卫星信号接收,主控制器通过串口接收MC5的GNSS定位模块发送的高精度位姿信息,实现自动转向导航;而在行间作业区域,由于果树冠层对GNSS信号产生遮挡,差分定位精度显著下降[16]。ZED2双目相机获取的点云信息通过串口传输至主控制器,用于行间定位与导航路径规划。由Arduino控制的下位机接收主控制器指令,精准控制前轮转角与后轮转速,提升路径跟踪能力,保障底盘在复杂果园环境下的自主安全运行[17-18]。

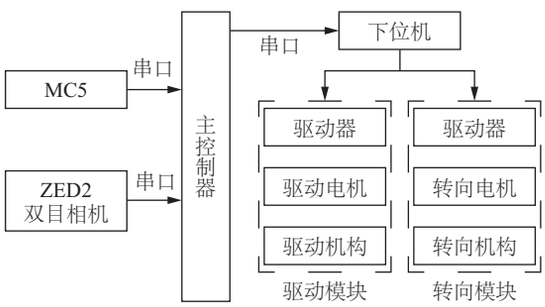


图17 电控系统工作原理

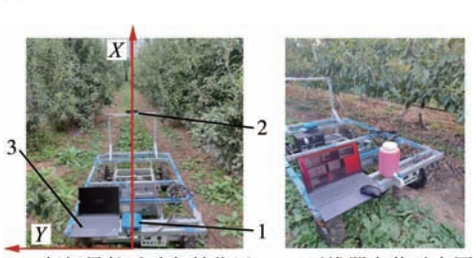
Figure 17 Working principle of electronic control system

4 试验结果与分析

4.1 行间导航路径拟合精度试验

4.1.1 试验设计

为确保试验的可重复性与数据的准确性,试验开始前将机器人底盘置于果园行间,并使用卷尺测量果树的行距,以此标定行间中心线作为导航起点,具体如图18(a)所示。



(a) 行间导航试验起始位置 (b) 画线器安装示意图

图18 田间实验图

Figure 18 Field experiment diagram

1. MC5 2. 双目相机 3. 主控制器

在试验过程中,机器人分别以0.5 m/s和1.0 m/s两种速度进行自动导航,每种速度下重复试验3次,降低随机误差的影响。每次试验设定前进距离为30 m,并通过安装在底盘后轴中心的画线器对行驶轨迹进行

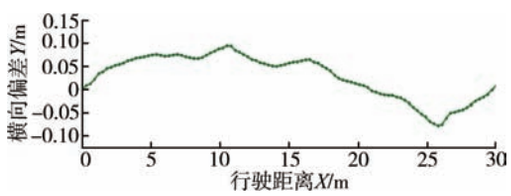
标记，从而获取实际运行路径，如图 18(b)所示。

为获取导航误差数据，从导航起点开始，每隔 30 cm 使用卷尺测量果树行距，并据此计算并标记理论导航轨迹点。随后将机器人实际行驶轨迹与理论轨迹进行对比，计算横向偏差，并在后续分析中评估导航系统的精度与稳定性。

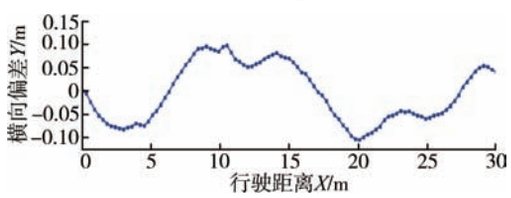
4.1.2　试验结果与分析

图 19 展示了机器人在 0.5 m/s 速度下进行行间导航时的横向偏差变化情况。图中横坐标表示累计行驶距离，纵坐标表示每一位置点的横向偏差。横向偏差为正时表示实际轨迹偏离理论中心线向左，偏差为负则表示轨迹偏右。

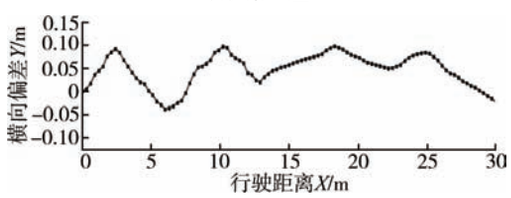
结果表明，机器人在行驶过程中围绕理论中心线左右波动，表明导航系统能够根据偏差实时调整底盘姿态以维持行进稳定性。



(a) 第 1 组



(b) 第 2 组



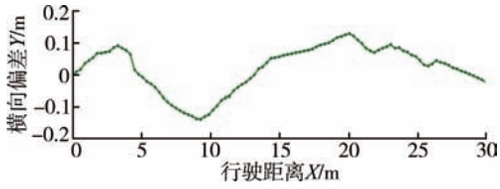
(c) 第 3 组

图 19　0.5 m/s 时横向偏差

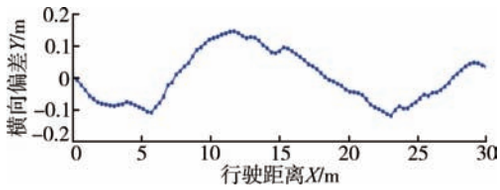
Figure 19　Lateral error in 0.5 m/s

图 20 为 1.0 m/s 速度下的横向偏差变化情况。与 0.5 m/s 相比，随着速度的提升，横向偏差整体有所增加，但仍保持在允许误差范围内。

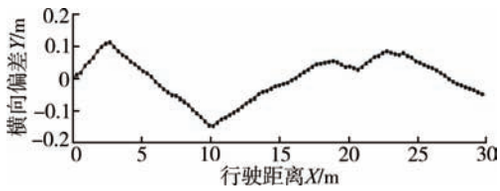
表 3 汇总了不同速度下 3 组试验的横向偏差最大值、平均值及标准差。数据显示，在 0.5 m/s 条件下，最大偏差均值为 0.099 m，平均偏差均值为 0.052 m，标准差均值为 0.026 m；而在 1.0 m/s 条件下，最大偏差均值为 0.145 m，平均偏差均值为 0.063 m，标准差均值为 0.036 m。速度提升后导航偏差增大的原因，主要是控制周期不变导致两次控制输出之间底盘姿态调整过度。总体来看，导航误差仍控制在合理范围内，验证了本研究所构建的导航系统具备良好的精度和稳定性，能够满足果园行间作业需求。



(a) 第 1 组



(b) 第 2 组



(c) 第 3 组

图 20　1 m/s 时横向偏差

Figure 20　Lateral error in 1 m/s

表 3　路径跟踪试验数据结果

Table 3　Path tracking test data results

速度/(m·s^{-1})	试验序号	最大偏差绝对值/m	平均偏差绝对值/m	标准差/m
0.5	1	0.095	0.049	0.025
	2	0.105	0.056	0.026
	3	0.098	0.052	0.027
	平均值	0.099	0.052	0.026
1	1	0.140	0.065	0.037
	2	0.146	0.069	0.038
	3	0.149	0.054	0.035
	平均值	0.145	0.063	0.036

4.2　地头换行试验

4.2.1　试验设计

为验证机器人在地头换行过程中的导航精度与运行稳定性，试验开始前需采集路径控制点。根据果园行距及机器人运动学约束，分别生成跨一行与跨两行的换行路径，并对路径进行离散化处理，便于导航控制程序调用。随后将机器人底盘置于果树行尾，距地头约 2 m 处作为初始位置，运行导航程序以启动自动换行流程，试验过程如图 21 所示。

在换行导航过程中，机器人底盘通过 MC5 高精度定位系统实现实时位置记录，确保轨迹数据的准确性，

以用于后续的误差分析。换行完成后,绘制实际行驶轨迹与理论轨迹的对比图,并计算横向偏差,从而对导航系统的精度与稳定性进行量化评估。



图 21 地头换行试验过程

Figure 21 Field row-switching test process

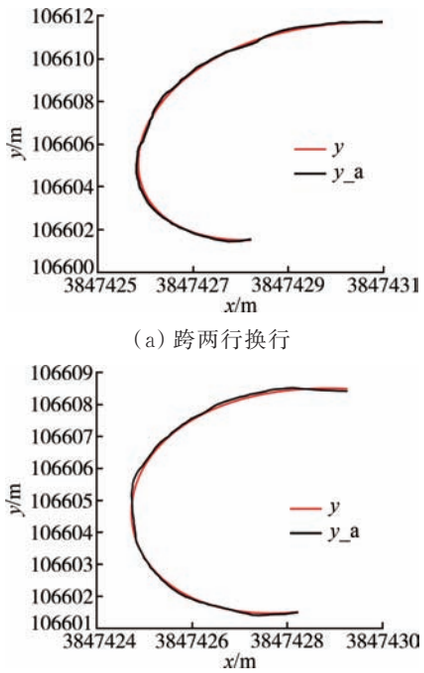
4.2.2 试验结果与分析

由于GNSS采集的定位数据采用经纬度表示,故在进行误差分析前,需将其转换为平面直角坐标系,以便进行轨迹对比及误差计算。使用Origin软件绘制的实际行驶轨迹与理论轨迹对比图如图22所示,其中图22(a)对应跨两行换行,图22(b)对应跨一行换行。图中红色曲线表示理论轨迹,黑色曲线表示底盘实际行驶轨迹。

从图中可以看出,所提出的换行路径规划方法与导航控制策略能有效实现机器人底盘的自动换行功能,且实际轨迹整体贴合理论路径。在跨两行换行试验中,路径跟踪效果良好,实际轨迹紧贴理论曲线;而在跨一行换行试验中,底盘在转弯过程中整体偏离理论路径外侧,说明在较小曲率半径路径条件下导航误差有所增加。为进一步验证该现象,本研究对横向偏差进行定量分析。

对每个实际行驶轨迹点计算其与理论轨迹的横向偏差,结果如表4所示。从数据可见,跨两行换行的平均横向偏差为0.052 m,最大偏差为0.097 m;而跨一行换行的平均横向偏差为0.066 m,最大偏差为0.113 m,均明显高于跨两行换行。出现该差异的主要原因在于,跨一行换行路径的曲率半径整体小于跨两行换行,然而机器人轮式底盘的转弯半径受物理结构限制,难以在小曲率条件下精准跟踪理论路径,导致实际轨迹偏离理论轨迹并整体外扩,从而产生较大横向误差。

综上所述,无论是跨一行还是跨两行换行,本研究所设计的地头换行方法均能较好地完成换行任务。机器人运行过程中姿态稳定、轨迹连续,且横向偏差控制在可接受范围内,满足果园自动导航作业的精度需求。



(a) 跨两行换行

(b) 跨一行换行

图 22 实际轨迹与理论轨迹对比图

Figure 22 Comparison diagram of actual trajectory and theoretical trajectory

表 4 横向误差表

Table 4 Transverse error table

跨行数	试验序号	平均偏差绝对值/m	最大偏差绝对值/m
1	1	0.059	0.106
	2	0.068	0.115
	3	0.072	0.119
2	1	0.048	0.094
	2	0.056	0.101
	3	0.052	0.098

5 结论

1)提出一种导航路径动态切换策略,通过实时监测点云信息、GNSS定位精度以及与预设路径的距离等关键参数,实现相机导航与GNSS导航的智能切换。

2)针对果园作业需求,研究设计了一种结合梭式套行模式与贝塞尔曲线的全局路径规划方法,并在不同行驶速度及地头换行情境中对其有效性进行了验证。

试验结果表明,该系统在行间导航中的最大平均偏差为0.099 m;在地头换行任务中,跨两行换行的平

均横向偏差为0.052 m，最大偏差为0.097 m；而跨一行换行的平均横向偏差为0.066 m，最大偏差为0.113 m。整体表现出良好的路径跟踪能力和姿态稳定性，能够适应复杂果园环境下的导航需求。

3)所构建的导航系统为果园自动化装备的实地部署提供了技术支持，未来可进一步结合多模态感知与强化学习策略，拓展其在坡地果园、障碍物密集区及不同作物类型下的泛化能力。

参 考 文 献

[1] 胡广锐. 标准化果园环境下苹果智能采收关键技术研究[D]. 杨凌：西北农林科技大学，2024.
HU Guangrui. Key technologies of apple intelligent harvesting in standardized orchard [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2024.

[2] 周建军，周文彬，刘建东，等. 果园机器人自动导航技术研究进展[J]. 计算机与数字工程，2019，47(3)：571－576，586.
ZHOU Jianjun, ZHOU Wenbin, LIU Jiandong, et al. Review of research on automatic navigation robot in orchard [J]. Computer & Digital Engineering, 2019, 47(3): 571－576, 586.

[3] SINGH R, NAGLA K S. Comparative analysis of range sensors for the robust autonomous navigation－a review[J]. Sensor Review, 2020, 40(1): 17－41.

[4] 王得志，王延鑫，汪小昱，等. 农业机器人中的管理与采摘技术：现状、挑战与未来发展[J]. 智能化农业装备学报(中英文)，2025，6(2)：1－23.
WANG Dezhi, WANG Yanxin, WANG Xiaochan, et al. Management and harvesting technologies in agricultural robotics: Current status, challenges and future developments [J]. Journal of Intelligent Agricultural Mechanization, 2025, 6(2): 1－23.

[5] 周俊，姬长英. 自主车辆导航系统中的多传感器融合技术[J]. 农业机械学报，2002，33(5)：113－116.
ZHOU Jun, JI Changying. Multi-sensor fusion in navigation of autonomous vehicle [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2002, 33 (5): 113－116.

[6] 张津国，蔡建峰，姜蓉蓉，等. 果园作业机器人自主导航多任务联合感知方法研究[J]. 智能化农业装备学报(中英文)，2025，6(2)：35－43.
ZHANG Jinguo, CAI Jianfeng, JIANG Rongrong, et al. Multi-task joint perception framework for autonomous navigation in orchard robotics [J]. Journal of Intelligent Agricultural Mechanization, 2025, 6(2): 35－43.

[7] 黄沛琛. 基于视觉与卫星定位的履带式果园机器人的导航系统研究[D]. 武汉：华南农业大学，2019.
HUANG Peichen. Research on orchard navigation system for tracked robot basedon machine vision and GNSS [D]. Wuhan: South China Agricultural University, 2019.

[8] 李雪峰. 基于多源信息融合的果园移动机器人自主定位导航系统研究[D]. 南宁：广西大学，2022.
LI Xuefeng. Research on autonomous positioning andnavigation of orchard mobile robots [D]. Nanning: Guangxi University, 2022.

[9] 张隆梅，刘岗微，齐彦栋，等. 农业机械无人驾驶系统关键技术研究进展[J]. 智能化农业装备学报(中英文)，2022，3(1)：27－36.
ZHANG Longmei, LIU Gangwei, QI Yandong, et al. Research progress on key technologies of agricultural machinery unmanned driving system [J]. Journal of Intelligent Agricultural Mechanization (in Chinese and English), 2022, 3(1): 27－36.

[10] DURAKLI Z, NABIYEV V. A new approach based on Bezier curves to solve path planning problems for mobile robots [J]. Journal of Computational Science, 2022, 58: 101540.

[11] 高国民. 基于多源信息融合的红花采摘机器人田间导航系统研究[D]. 乌鲁木齐：新疆农业大学，2023.
GAO Guomin. Research on field navigation system of safflower picking robot based on multi-source information fusion [D]. Urumqi: Xinjiang Agricultural University, 2023.

[12] YIN X, DU J, NOGUCHI N, et al. Development of autonomous navigation system for rice transplanter [J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2018, 11(6): 89－94.

[13] 刘业磊，李跃光. 曲柄摇杆机构在转向机中轴综合台中的应用[J]. 长春大学学报，2014，24(2)：160－163.
LIU Yelei, LI Yueguang. Application of crank-rocker mechanism in synthesized test-bed of steering gear medial axis [J]. Journal of Changchun University, 2014, 24(2): 160－163.

[14] 杨世明，马庆国. 双摇杆机构运动分析及设计研究[J]. 机械设计与研究，2018，34(2)：71－75.
YANG Shiming, MA Qingguo. Motion analysis and design of double-rocker mechanism [J]. Mechanical Design and Research, 2018, 34(2): 71－75.

[15] 刘美辰. 农机作业障碍物检测与避障方法研究[D]. 杨凌：西北农林科技大学，2018.
LIU Meichen. Research on inspection and obstacle avoidance methods of agro-machinery obstructions [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2018.

[16] 冉维旭. 基于AprilTag视觉基准系统的果园辅助定位算法研究[D]. 淄博：山东理工大学，2023.
RAN Weixu. Research on orchard assisted positioning algorithm based on AprilTag visual reference system [D].

Zibo: Shandong University of Technology, 2023.

[17] 胡广锐, 孔微雨, 齐闯, 等. 果园环境下移动采摘机器人导航路径优化[J]. 农业工程学报, 2021, 37(9): 175-184.
HU Guangrui, KONG Weiyu, QI Chuang, et al. Optimization of the navigation path for a mobile harvesting robot in orchard environment [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2021, 37(9): 175-184.

[18] 逯慧良. 果树采摘机器人车体导航系统研究与设计[D]. 镇江: 江苏大学, 2012.
TAO Huiliang. Research and design of vehicle body navigation system for fruit tree picking robot [D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2012.

Design and experiment of autonomous navigation system for apple picking robot based on visual fusion and GNSS

WEN Shiwei[1], GE Yahao[1], JIA Jionglong[1], WEI Naishuo[1], CHEN Yu[1, 2], CHEN Jun[1, 2*]

(1. *Northwest A & F University College of Mechanical and Electronic Engineering, Yangling* 712100, *China*; 2. *Shaanxi Provincial Agricultural Equipment Engineering Technology Research Center, Yangling* 712100, *China*)

Abstract: As one of the world leading apple producers, China is facing increasing agricultural labor shortages caused by rising labor costs and demographic shifts. Promoting the automation and intelligent transformation of orchard operations has become a key factor in improving agricultural efficiency. In response to the standardized cultivation patterns of modern apple orchards, this study designs and implements an autonomous navigation system based on the fusion of Global Navigation Satellite System (GNSS) and vision-based navigation. The system is built on an Ackermann-steering chassis and integrates a front-wheel angle detection module and automatic steering control. To enhance the system adaptability in complex orchard environments, a dynamic navigation mode switching strategy is proposed, which relies on key parameters such as point cloud data quality, GNSS positioning accuracy, and path deviation. This enables intelligent switching between GNSS and vision-based navigation modes, allowing the system to meet varying accuracy requirements across different operational areas. In terms of path planning, a full-coverage navigation strategy is developed by combining a shuttle-style inter-row pattern with third-order Bézier curves. Inter-row paths are extracted by filtering, down sampling, and linearly fitting the stereo vision point cloud to determine the navigation centerline. Headland turning paths are generated based on orchard geometry parameters using Bézier curves, optimizing turning maneuvers and reducing unnecessary travel. Field tests demonstrate that the system achieves high-precision path tracking at various travel speeds, with a minimum lateral deviation of 0.052 meters. During headland turning, the average navigation deviations for two-row and single-row crossings are 0.052 meters and 0.066 meters, respectively, meeting the accuracy requirements of practical orchard operations. In conclusion, the proposed navigation system demonstrates strong environmental adaptability and navigation precision, providing solid technical support for the engineering application of automated orchard equipment.

Keywords: vision-based fusion navigation; shuttle coverage global path planning; apple harvesting robot; standardized orchard; dynamic navigation mode switching strategy

Foundation items: Shaanxi Provincial Department of Science and Technology Project (32272001); Sub-project of the National Key R&D Program of China(2022YFD1900304)

First Author: WEN Shiwei, E-mail: wsw142301@nwafu.edu.cn

* **Correspondence Author:** CHEN Jun, E-mail: chenjun_jdxy@nwsuaf.edu.cn