

基于IMU和UWB的塑料大棚采摘机器人定位方法研究

洪志超¹ 黎静^{1,2} 赵洋^{1,2} 伏杰煜¹ 蒋高峰¹ 薛龙^{1,2}

(1. 江西农业大学工学院, 南昌 330045; 2. 现代农业装备江西省重点实验室, 南昌 330045)

摘要: 针对农业塑料大棚环境中,地势高程差异和地面凹凸不平导致超宽带(Ultra-wideband, UWB)定位系统定位精度下降,影响采摘机器人导航与精准采摘作业的问题,本文提出了一种基于惯性测量单元(Inertial measurement unit, IMU)和UWB的实时纠偏定位方法。首先,通过罗德里格斯旋转矩阵和仿射变换修正栅格地图;进而,预处理UWB定位数据,通过IMU获取采摘机器人平台从当前姿态变换到水平基准姿态的旋转矩阵,计算由UWB标签安装位置修正到采摘机器人平台实际位置的横向偏差和纵向偏差,从而对地面环境造成的UWB定位偏差实时纠偏;最终,实现采摘机器人平台自主导航。试验结果表明,经变换修正的栅格地图,最大绝对误差、最大相对误差和均方根误差分别为0.150 m、2.27%、0.067 m;基于IMU和UWB的塑料大棚实时纠偏定位方法,横向和纵向定位偏差分别小于等于0.065、0.069 m,与UWB原始定位数据相比,横向定位精度提高26.1%,纵向定位精度提高13.8%;应用上述定位方法的采摘机器人平台以速度0.15、0.30、0.45 m/s自主导航时,横向导航偏差、纵向导航偏差和航向偏差的平均值分别小于等于0.057 m、0.079 m和8.211°,标准差分别小于等于0.039 m、0.069 m和4.307°。

关键词: 塑料大棚; 自主导航; 超宽带定位; 即时定位与地图构建; 实时纠偏

中图分类号: S24 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2026)05-0105-10

OSID:



Positioning Method for Picking Robot in Plastic Tunnels Based on IMU and UWB

HONG Zhichao¹ LI Jing^{1,2} ZHAO Yang^{1,2} FU Jieyu¹ JIANG Gaofeng¹ XUE Long^{1,2}

(1. College of Engineering, Jiangxi Agricultural University, Nanchang 330045, China

2. Jiangxi Provincial Key Laboratory of Modern Agricultural Equipment, Nanchang 330045, China)

Abstract: In agricultural plastic tunnel environments, the positioning accuracy of ultra-wideband (UWB) positioning systems is compromised due to variations in terrain elevation and ground surface irregularities, thereby affecting the navigation of picking robots and precise picking operations. A real-time correction and positioning method was proposed based on inertial measurement unit (IMU) and UWB. Firstly, the grid map was corrected by using Rodrigues' rotation matrix and affine transformation. Subsequently, the UWB positioning data was preprocessed. By utilizing the rotation matrix obtained from the IMU that transformed the picking robot platform from its current attitude to the horizontal reference attitude, the lateral and longitudinal deviations from the UWB tag installation position to the actual position of the picking robot platform were calculated, thereby enabling real-time correction of UWB positioning errors caused by ground environmental conditions. Finally, autonomous navigation of the picking robot platform was achieved. The experimental results indicated that the maximum absolute error, maximum relative error, and root mean square error of the transformation-corrected grid map were 0.150 m, 2.27%, and 0.067 m, respectively. The real-time correction and positioning method based on IMU and UWB achieved lateral and longitudinal positioning deviations of less than or equal to 0.065 m and 0.069 m, respectively. Compared with the original UWB positioning data, the lateral positioning accuracy was improved by 26.1% and the longitudinal positioning accuracy was improved by 13.8%. When the picking robot platform employing the aforementioned positioning method operated at autonomous navigation speeds of 0.15 m/s, 0.30 m/s, and 0.45 m/s, the mean values of the lateral navigation

收稿日期: 2025-10-26 修回日期: 2025-11-03

基金项目: 江西省重点研发计划项目(20232BBF60017)

作者简介: 洪志超(2000—),男,博士生,主要从事农业机器人研究,E-mail: zhichao_hong2022@163.com

通信作者: 薛龙(1977—),男,教授,博士,主要从事地面力学、仿生地面行走等研究,E-mail: ultimata@163.com

deviation, longitudinal navigation deviation, and heading deviation were less than or equal to 0.057 m, 0.079 m, and 8.211°, respectively, with standard deviations less than or equal to 0.039 m, 0.069 m, and 4.307°, respectively.

Key words: plastic tunnel; autonomous navigation; ultra-wideband positioning; simultaneous localization and mapping; real-time correction and positioning

0 引言

在传统农业向数字化、智能化转型的背景下,采摘自动化成为了现代农业进程中的关键技术瓶颈与核心突破点。实现采摘机器人自主导航与精准作业的关键在于高精度、高可靠性的实时定位技术^[1-2]。设施农业中的温室大棚一般分为小拱棚、塑料大棚、日光温室、连栋温室等,其中塑料大棚成本低廉、搭建简单,占比约 63%^[3]。因此,研究应用于塑料大棚环境的采摘机器人平台具有重要意义,不仅能显著节省人力成本,还能有效提升生产效率和作业质量^[4-5]。

常见的定位方式有全球导航卫星系统(Global navigation satellite system, GNSS)定位、航位推算定位、激光雷达定位、视觉定位、超宽带(Ultra-wideband, UWB)定位等^[6-8]。在室外开阔环境下,GNSS可提供较为可靠的定位信息^[9-10],然而塑料大棚的金属骨架和塑料薄膜会对GNSS信号产生衰减与多路径干扰^[11-12],导致定位精度下降甚至无法定位。航位推算定位在地面湿滑、土壤松软或不平整环境下,车轮发生打滑和空转导致里程数据与实际位移不一致,产生累积误差^[13]。激光雷达定位在地面存在连续凹凸时,点云匹配算法易产生误配准;作物行间结构高度相似时,特征匹配不确定性增加^[14]。视觉定位易受大棚内光照变化和行间作物高重复性特征的影响,出现画面失真和特征跟踪丢失的问题^[15]。UWB技术凭借其厘米级定位精度、强抗干扰能力、不依赖环境信息定位及良好的穿透性能^[16],被广泛应用于室内及温室环境中的定位任务^[17-19],成为农业机器人在信号受限环境下定位的新选择^[20-21]。

在塑料大棚的实际应用场景中,UWB定位技术的性能受到多径效应和非视距(Non line of sight, NLOS)通信的显著影响^[22-24]。毕松等^[25]建立了测距修正模型,通过扩展卡尔曼滤波器融合UWB与IMU数据,提高了温室植保机器人NLOS通信定位精度;张岳阳等^[26]采用联邦卡尔曼滤波算法融合单目视觉与UWB定位数据,提高了育苗温室移动平台的定位精度;LONG等^[27]将UWB技术和激光雷达即时定位与地图构建技术结合,利用拓展卡尔曼滤波和自适应蒙特卡罗算法融合多传感器数据,提

高了温室机器人定位精度;张兆国等^[28]提出基于改进自适应卡尔曼滤波算法的UWB定位技术,通过识别并抑制发散现象,提高定位精度;NIU等^[29]提出了一种基于深度学习的测距误差抑制方法,通过预测并抑制定位模块测距误差,显著减小了定位误差;LI等^[30]提出了一种基于UWB测距残差分布的双模式通信状态识别与修正方法,通过分析测距偏差成因,建立校正模型,采用改进无迹卡尔曼滤波算法修正NLOS误差,提高了温室的定位精度。现有研究多数基于地面平坦的理想假设,在结构化或非结构化环境中验证定位精度。针对非平整环境下UWB定位偏差的补偿,现有融合方法多集中于信号遮挡下的航位推算,缺乏对姿态所致UWB标签位置与机器人基准点实际位置间的几何偏差补偿。

根据塑料大棚工程技术规范^[31],塑料大棚建设时地形坡度不大于10°,加之长期农事操作导致内部地面凹凸不平,实际大棚环境中存在明显的高程变化与起伏。该类环境易引发采摘机器人的姿态变化,造成UWB标签位置偏移。UWB定位系统输出的数据是标签位置,而非采摘机器人的实际位置,这一偏差会导致导航和采摘操作出现系统误差,该问题尚未得到深入研究和解决。

基于UWB与IMU的功能互补性,本文提出一种基于IMU和UWB的塑料大棚实时纠偏定位方法:IMU高频采集机器人姿态,通过当前姿态至水平基准姿态的坐标变换建立UWB标签坐标至采摘机器人平台实际位置坐标的映射关系,动态修正位置偏差。UWB定位系统提供绝对位置约束,IMU高频感知车身姿态变化,有效克服因地面环境引起的定位偏移,为实现塑料大棚非平整地面环境的高精度定位与自主作业提供技术支撑。

1 定位方法

1.1 采摘机器人平台与试验塑料大棚

1.1.1 采摘机器人平台

本研究基于图1所示的采摘机器人平台开展,该平台搭载Ubuntu 18.04操作系统,基于机器人操作系统开发,硬件参数如表1所示。其中2D激光雷达倒置安装于采摘机器人平台前方,与平台底面间的垂直距离为35 cm,该高度约为紫茄植株高度

的1/2,用于扫描紫茄植株截面位置,感知塑料大棚环境障碍物信息;IMU安装于2D激光雷达下方,实时获取采摘机器人平台姿态;UWB定位系统使用三维定位方法,允许定位标签与基站平面存在高度差,用于获取采摘机器人平台在塑料大棚内部的全局位置,UWB定位标签安装于采摘机器人平台右后方,安装高度可根据作物高度调节;试验时,定位标签与平台底面间的垂直距离调节为70 cm,其高度大于等于试验时的紫茄植株高度;直流伺服电机输出轴连接速比80的蜗轮蜗杆减速器;远程控制端通过ToDesk软件连接到采摘机器人平台控制界面。

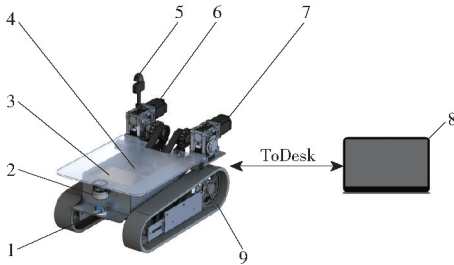


图1 采摘机器人平台总体构成图

Fig.1 Overall composition of picking robot

- 1. IMU 2. 2D激光雷达 3. 锂电池 4. Jetson Xavier 开发板
- 5. UWB定位标签 6,7. 直流伺服电机 8. 远程控制端 9. 履带式底盘

表1 采摘机器人平台硬件参数

Tab.1 Picking robot platform hardware parameters

部件名称	制造商	型号	参数
IMU	维特智能	WTGAHRS3-485	俯仰角和横滚角测量精度:0.2° 偏航角测量精度:0.5° 角参数测量分辨率:0.0055°
2D激光雷达	镭神智能	M10P	最大扫描距离:25 m
锂电池	超威电池	BM4820CE	额定电压:48 V 额定容量:20 A·h
嵌入式计算平台	英伟达	Jetson Xavier NX	系统:Ubuntu 18.04 峰值计算能力:21 TOPS
UWB	空循环	LinkTrack	2D定位精度:10 cm 测量分辨率:0.001 m
伺服电机	时代超群	HC80A4A07530-SCA	额定电压:48 V 额定功率:0.75 kW 额定转速:3 000 r/min 尺寸:800 mm × 500 mm × 700 mm
采摘机器人平台	江西农业大学	自研	移动速度:0~0.5 m/s 最大载荷:100 kg 离地间隙:120 mm

1.1.2 试验塑料大棚

试验塑料大棚位于江西省南昌市江西农业大学

农业科技园农作物试验示范区的紫茄种植大棚,试验场地示意图如图2所示。

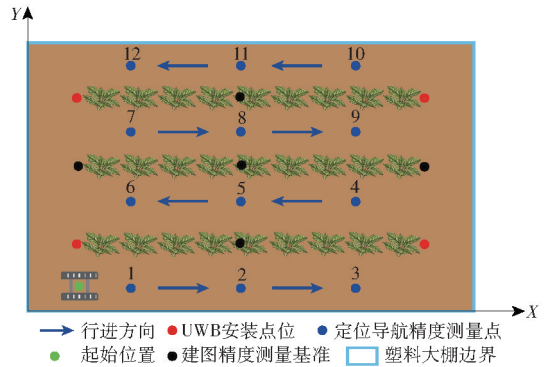


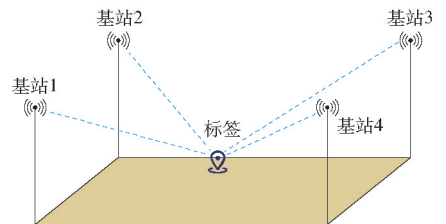
图2 塑料大棚内部场景示意图

Fig.2 Plastic tunnel interior scene schematic

塑料大棚内部环境如图3a所示,大棚长15 m,宽8 m,地块整体向西北倾斜,内部地面凹凸不平。试验塑料大棚内部田垄规格参数为:垄距0.8~1.0 m,垄宽1.1~1.2 m,垄高0.1~0.2 m,垄长12.6 m。沿东西向种植3垄紫茄植株,每垄种植2行,试验时紫茄植株高度小于等于70 cm。塑料大棚中的UWB定位系统安装示意图如图3b所示,4个定位基站安装在塑料大棚内部的四角,定位标签安装在采摘机器人平台上。



(a) 试验场地实景图



(b) UWB安装示意图

图3 试验设备及试验场地

Fig.3 Experiment equipment and experiment site

1.2 自主导航功能实现

1.2.1 环境地图构建

通过2D激光雷达和Cartographer算法构建的塑料大棚栅格地图如图4所示,地图中每个像素代表的实际距离为5 cm,其中黑色像素组成的矩形为塑料大棚边界,矩形内部不规则的黑色像素块为紫茄植株横截面,矩形内部白色像素区域为可通过区域,矩形外部的灰色区域为未知区域。

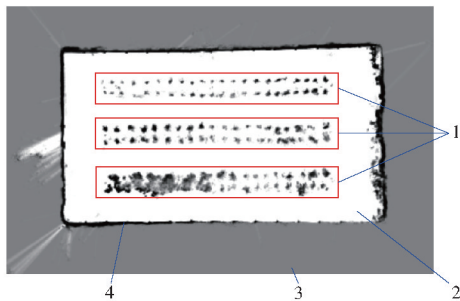


图4 大棚内部环境地图

Fig.4 Tunnel internal environment map

1. 紫茄植株横截面 2. 可通过区域 3. 未知区域 4. 塑料大棚边界

1.2.2 地图后处理

如图5所示,采用德力西3线激光水平仪(水平精度0.2 mm/m;自动补偿范围 $\pm 3^\circ$)构建平面A,已知地块C上点 P_0 、 P_1 、 P_2 的坐标,将其表示为列向量

$$\mathbf{p}_0 = [0 \ 0 \ 0]^T \quad (1)$$

$$\mathbf{p}_1 = [L_x \ 0 \ h_0 - h_1]^T \quad (2)$$

$$\mathbf{p}_2 = [0 \ L_y \ h_0 - h_2]^T \quad (3)$$

式中 \mathbf{p}_i ——点 P_i 对应的列向量, $i=0,1,2$

h_0 ——点D、 P_0 间距离,m

h_1 ——点E、 P_1 间距离,m

h_2 ——点F、 P_2 间距离,m

L_x ——点O、 P'_1 间距离,m

L_y ——点O、 P'_2 间距离,m

将地块C投影到 $X-Y$ 平面,得到投影面B上4个角点为点 P'_0 、 P'_1 、 P'_2 、 P'_3 ,将其表示为列向量

$$\mathbf{p}'_0 = [0 \ 0 \ 0]^T \quad (4)$$

$$\mathbf{p}'_1 = [L_x \ 0 \ 0]^T \quad (5)$$

$$\mathbf{p}'_2 = [0 \ L_y \ 0]^T \quad (6)$$

$$\mathbf{p}'_3 = [L_x \ L_y \ 0]^T \quad (7)$$

式中 \mathbf{p}'_i ——点 P'_i 对应的列向量, $i=0,1,2,3$

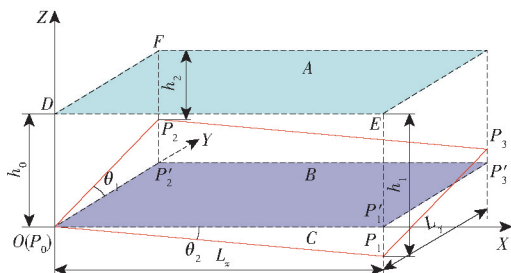


图5 栅格地图变换示意图

Fig.5 Raster map transformation diagram

在平面C上,由点 P_0 、 P_1 、 P_2 计算点 P_3 的坐标。构造平面C上的2个向量,则平面C的法向量 \mathbf{n} 为

$$\mathbf{n} = \mathbf{v}_1 \times \mathbf{v}_2 \quad (8)$$

其中 $\mathbf{n} = [L_y(h_1 - h_0) \ L_x(h_2 - h_0) \ L_x L_y]$ (9)

式中 \mathbf{v}_1 ——平面C上O指向 P_1 的向量

\mathbf{v}_2 ——平面C上O指向 P_2 的向量

由 \mathbf{n} 得到平面C的解析式为

$$L_y(h_1 - h_0)x + L_x(h_2 - h_0)y + L_x L_y z = 0 \quad (10)$$

将点 P_3 的X和Y坐标值代入平面C的解析式中,计算出点 P_3 的坐标,将其表示为列向量

$$\mathbf{p}_3 = \begin{bmatrix} L_x & L_y & -\frac{L_x(h_1 - h_0)L_y + L_x(h_2 - h_0)L_y}{L_x L_y} \end{bmatrix}^T \quad (11)$$

式中 \mathbf{p}_3 ——点 P_3 对应的列向量

由于塑料大棚内部地势存在一定的高程差异,采用2D激光雷达构建的地图在轮廓与内部作物分布上出现几何形变。为消除该形变,首先通过罗德里格斯公式计算旋转矩阵,将与平面C平行的原始地图旋转至基准水平面 $X-Y$;随后应用仿射变换将旋转后的地图变换为标准矩形,作为导航地图。

由罗德里格斯旋转公式构建平面C旋转到平面 $X-Y$ 的旋转矩阵,计算过程为

$$\mathbf{u} = \mathbf{n} \times \mathbf{k} \quad (12)$$

$$\theta = \arccos(\mathbf{u}/|\mathbf{n}|) \quad (13)$$

$$\mathbf{R}_{\text{rotation}} = \mathbf{I} + \sin\theta \cdot \mathbf{K} + (1 - \cos\theta) \cdot \mathbf{K}^2 \quad (14)$$

其中

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -L_y(h_1 - h_0) \\ 0 & 0 & -L_x(h_2 - h_0) \\ L_y(h_1 - h_0) & L_x(h_2 - h_0) & 0 \end{bmatrix} \quad (15)$$

式中 \mathbf{u} ——平面C旋转到平面 $X-Y$ 的旋转轴

\mathbf{k} ——平面 $X-Y$ 的单位法向量

θ ——平面C旋转到平面 $X-Y$ 的旋转角,rad

$\mathbf{R}_{\text{rotation}}$ ——平面C旋转到平面 $X-Y$ 的旋转矩阵

\mathbf{I} ——三阶单位矩阵

\mathbf{K} ——旋转轴 \mathbf{u} 的叉积矩阵

将点 P_i 旋转到平面 $X-Y$ 得到仿射变换源点 $P_{i_rotation}$ 坐标为

$$\mathbf{p}_{i_rotation} = \mathbf{R}_{\text{rotation}} \cdot \mathbf{p}_i \quad (i=0,1,2,3) \quad (16)$$

式中 $\mathbf{p}_{i_rotation}$ ——仿射变换源点 $P_{i_rotation}$ 对应的列向量

仿射变换目标点和源点均在平面 $X-Y$,仿射变换矩阵可以表示为

$$\mathbf{p}'_i = \mathbf{R}_{\text{affine}} \cdot \mathbf{p}_{i_rotation} \quad (i=0,1,2,3) \quad (17)$$

式中 $\mathbf{R}_{\text{affine}}$ ——仿射变换矩阵

使用Python脚本读取原始栅格地图,通过罗德里格斯旋转矩阵和仿射变换矩阵转换原始二维栅格地图,将转换后的地图作为导航地图。

1.2.3 基于IMU和UWB的塑料大棚实时纠偏定位方法

本研究提出的基于IMU和UWB的塑料大棚实时纠偏定位方法流程图如图6所示。为确保UWB定位标签输出准确、可靠的位置数据,使用离群值剔除和滑动均值滤波算法对数据预处理。该方法的选择基于UWB信号在塑料大棚环境中易受多径效应、NLOS传播及电磁干扰等因素影响,导致原始观测数据中存在突发性的离群误差和高频随机噪声。

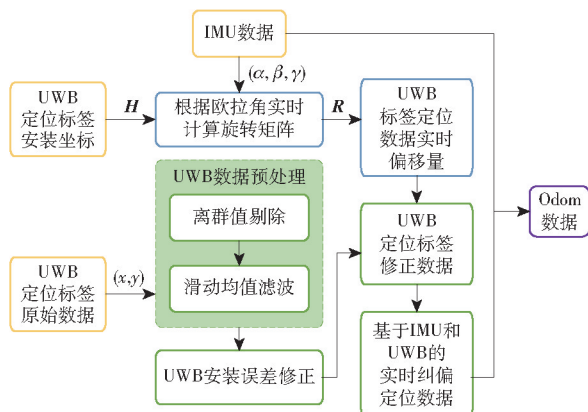


图6 基于IMU和UWB的塑料大棚实时纠偏定位方法流程图

Fig. 6 Real-time correction and positioning method based on IMU and UWB

离群值剔除作为第一级处理,能够快速识别并移除因塑料大棚内部设施遮挡等原因产生的、明显超出合理范围的位置跳变点,防止其干扰后续数据处理。

随后,采用滑动均值滤波算法实时平滑处理,该算法权衡了处理效率与性能需求。相较于卡尔曼滤波,滑动均值滤波无需先验模型且计算负担小;与指数加权移动平均等滤波方法相比,滑动均值滤波对滤波窗口内所有数据点赋予同等权重,能更有效地抑制独立同分布的高频随机噪声。

本算法采用等权重策略,对窗口内的每个数据点赋予相同的权重 $1/M$,并加权平均运算,得出当前的滤波结果。滤波窗口值 M 在系统初始化时设定并在运行中保持固定。 M 值过大能增强平滑效果,但会影响定位的实时性; M 值过小可能导致噪声抑制不足。本文基于UWB系统的采样频率 50 Hz 和采摘机器人平台典型运动速度 0.30 m/s ,设定 M 值为6。

在每个后续采样时刻,将新数据样本纳入滤波窗口,并移除最旧的数据样本,随后重新计算加权平均值,以更新滤波输出,此过程持续迭代进行。第 t 时刻坐标数据的滑动均值滤波值为

$$A_{xt} = \frac{1}{M} \sum_{i=0}^{M-1} X_{t-i} \quad (18)$$

$$A_{yt} = \frac{1}{M} \sum_{i=0}^{M-1} Y_{t-i} \quad (19)$$

式中 A_{xt} ——第 t 时刻 X 方向滑动均值滤波值, m
 A_{yt} ——第 t 时刻 Y 方向滑动均值滤波值, m
 X_{t-i} ——第 $t-i$ 时刻 X 方向定位标签数据值, m
 Y_{t-i} ——第 $t-i$ 时刻 Y 方向定位标签数据值, m

UWB定位标签安装在采摘机器人平台右后方,需要实时将UWB定位标签输出的位置数据修正到采摘机器人平台原点。采摘机器人平台坐标系原点处于采摘机器人平台俯视图的几何中心,前进方向为 X 轴正方向,前进方向左侧为 Y 轴正方向, Z 轴方向向上,UWB定位标签在安装位置的修正值为

$$D_{xs} = \sqrt{Q_x^2 + Q_y^2} \cos(\arctan(Q_y/Q_x) + \gamma) \quad (20)$$

$$D_{ys} = \sqrt{Q_x^2 + Q_y^2} \sin(\arctan(Q_y/Q_x) + \gamma) \quad (21)$$

式中 D_{xs} ——标签在安装位置 X 方向修正值, m
 D_{ys} ——标签在安装位置 Y 方向修正值, m
 Q_x ——标签和平台原点间在 X 方向的距离, m
 Q_y ——标签和平台原点间在 Y 方向的距离, m
 γ ——采摘机器人平台的偏航角, rad

如图7所示,对于地块存在高程差异和地面凹凸不平的塑料大棚内部环境,需要将栅格地图、UWB定位系统转换到水平基准坐标系,UWB定位标签与平台底面间的垂直距离为 70 cm ,4个UWB基站所在的平面与平面 A 平行,当采摘机器人平台由于地面环境因素造成姿态变化后,UWB定位标签的位置随之改变,此时主控读取的位置坐标为UWB标签所在位置的坐标,而不是采摘机器人平台坐标系原点的坐标,为了保证采摘机器人平台在塑料大棚内部的行走精度,需要实时计算由UWB标签位

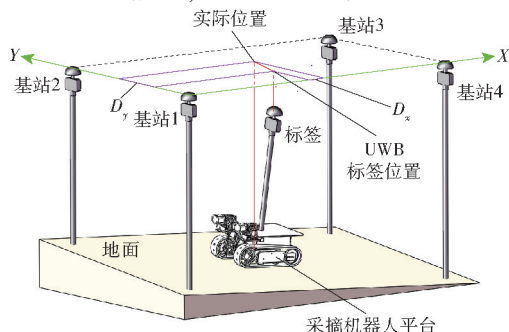


图7 地面导致的UWB定位标签偏移示意图
 Fig. 7 Schematic diagram of UWB positioning tag offset caused by ground

置修正到采摘机器人平台原点位置的 X 方向纠偏量和 Y 方向纠偏量。通过 IMU 可读取采摘机器人平台俯仰角、横滚角和偏航角分别为 α, β, γ (rad), 即采摘机器人平台从水平基准姿态旋转到当前姿态需要绕采摘机器人平台坐标系的 Z 轴、 Y 轴、 X 轴依次旋转 γ, β, α 。

绕 Z 轴的旋转示意图如图 8 所示, 由图 8 可得

$$\begin{cases} a = L_{ON} \cos \delta \\ b = L_{ON} \sin \delta \\ c = 0 \end{cases} \quad (22)$$

$$\begin{cases} a' = L_{ON} \cos(\delta - \gamma) \\ b' = L_{ON} \sin(\delta - \gamma) \\ c' = 0 \end{cases} \quad (23)$$

式中 (a, b, c) ——点 N 坐标

(a', b', c') ——点 N' 坐标

δ ——由点 O 指向 N 的向量与坐标系 X 轴之间的夹角, rad

L_{ON} ——线段 ON 的长度, m

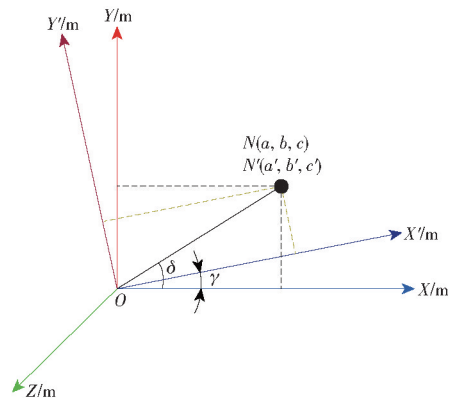


图 8 坐标系绕 Z 轴旋转示意图

Fig. 8 Diagram of coordinate system rotating around Z axis

由公式(22)、(23)可得

$$a' = a \cos \gamma + b \sin \gamma \quad (24)$$

$$b' = -a \sin \gamma + b \cos \gamma \quad (25)$$

绕 Z 轴旋转时, Z 轴坐标保持不变, 所以采摘机器人平台绕 Z 轴的旋转矩阵 R_z 为

$$R_z(\gamma) = \begin{bmatrix} \cos \gamma & \sin \gamma & 0 \\ -\sin \gamma & \cos \gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (26)$$

同理, 采摘机器人平台绕 Y 轴的旋转矩阵 R_y 为

$$R_y(\beta) = \begin{bmatrix} \cos \beta & 0 & -\sin \beta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \beta & 0 & \cos \beta \end{bmatrix} \quad (27)$$

采摘机器人平台绕 X 轴的旋转矩阵 R_x 为

$$R_x(\alpha) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & \sin \alpha \\ 0 & -\sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix} \quad (28)$$

根据 IMU 的姿态角定义, 采摘机器人平台从水平基准姿态旋转到当前姿态的 3 次旋转按照内旋 $Z-Y-X$ 顺序, 当前姿态到水平基准姿态的旋转为上述旋转的逆过程, 则当前姿态旋转到水平姿态的旋转矩阵 R 为

$$R = R_x^T(\alpha) \cdot R_y^T(\beta) \cdot R_z^T(\gamma) \quad (29)$$

计算纠偏定位方法纠偏量的表达式为

$$[D_x \ D_y \ 0]^T = R \cdot H \quad (30)$$

式中 D_x ——定位纠偏方法的 X 方向纠偏量, m

D_y ——定位纠偏方法的 Y 方向纠偏量, m

H ——定位标签安装坐标对应的列向量

综上所述, 通过基于 IMU 和 UWB 的塑料大棚实时纠偏定位方法计算的采摘机器人平台位置数据为

$$O_x = A_{xt} + D_{xs} + D_x \quad (31)$$

$$O_y = A_{yt} + D_{ys} + D_y \quad (32)$$

式中 O_x ——纠偏定位方法输出的 X 方向位置数据

O_y ——纠偏定位方法输出的 Y 方向位置数据

1.2.4 自主导航系统路径规划与导航

塑料大棚自主导航系统路径规划与导航基于 Navigation 框架实现。该框架提供了路径规划实现和代价地图插件, 接收导航目标点, 输入栅格地图和雷达传感器数据, 基于 IMU 和 UWB 的塑料大棚实时纠偏定位方法计算采摘机器人平台位置数据, 通过运动控制模块控制采摘机器人平台自主导航到指定的目标点, 在运动过程中实时反馈机器人自身的姿态与目标点状态, 导航实现框图如图 9 所示。

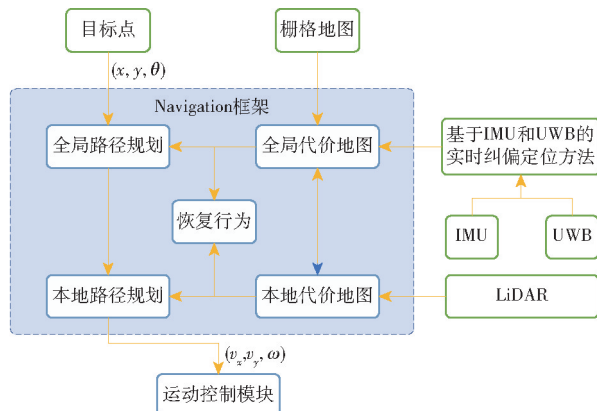


图 9 导航实现框图

Fig. 9 Navigation implementation framework diagram

路径规划和导航过程如下^[32]:

(1) 调用构建的栅格地图, 生成全局代价地图并接收目标点数据, 用于规划全局路径; 根据 2D 激光雷达实时数据更新环境信息生成本地代价地图, 用于规划本地路径和避障; 栅格地图的每个栅格被赋予代价值, 用于量化对应位置的通过性, 代价值计算函数为

$$\text{Cost}(d) = \begin{cases} 254 & (0 \leq d \leq r) \\ 253e^{-f(d-r)} & (r < d \leq r_{\text{outer}}) \\ 0 & (d > r_{\text{outer}}) \end{cases} \quad (33)$$

式中 $\text{Cost}()$ ——栅格代价值计算函数

d ——当前栅格到最近障碍物的距离, m

r ——采摘机器人平台的内切圆半径, m

r_{outer} ——膨胀半径, m

f ——代价缩放因子

(2) 采用 A^* 算法作为全局路径规划算法, 规划出最短且无碰撞的全局路线; 采用动态窗口法作为本地路径规划算法, 规划出局部路径, 规避环境中的动态障碍物。

(3) 根据规划路径生成采摘机器人平台实时运动速度, 采用差速运动学模型将运动速度解算为电机的转速指令。

对于该采摘机器人平台, 假设旋转中心和几何中心重合且不发生侧向滑动, 只考虑平面运动, 简化为双轮差速底盘运动模型, 则正运动学模型为

$$\begin{bmatrix} v_x \\ \omega_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_r + v_l \\ 2 \\ v_r - v_l \\ L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/2 & 1/2 \\ 1/L & -1/L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_r \\ v_l \end{bmatrix} \quad (34)$$

式中 v_x ——采摘机器人平台前进方向线速度, m/s

ω_z ——采摘机器人平台角速度, rad/s

v_l ——平台左侧履带移动速度, m/s

v_r ——平台右侧履带移动速度, m/s

L ——采摘机器人平台履带间距, m

逆运动学模型为

$$\begin{bmatrix} v_r \\ v_l \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_x + \frac{L}{2}\omega_z \\ v_x + \frac{L}{2}\omega_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \frac{L}{2} \\ 1 & -\frac{L}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_x \\ \omega_z \end{bmatrix} \quad (35)$$

2 采摘机器人平台性能测试试验设计

采摘机器人平台性能测试试验包括地图构建精度试验、定位精度试验和导航精度试验。地图构建精度试验是指经过变换修正后, 栅格地图上作物及障碍物的尺寸与实际环境尺寸的一致性; 定位精度试验是指基于IMU和UWB的塑料大棚实时纠偏定位方法计算出的位置数据和真实位置之间的偏差; 导航精度试验是指向导航系统发送目标点, 采摘机器人平台到达该目标点后, 到达的实际位置与目标点位置之间的偏差。

2.1 塑料大棚地图构建精度试验

通过地图构建精度试验, 验证该地图构建方式在塑料大棚环境下的精度与可靠性, 具体试验过程

如下: 启动地图构建模块, 遥控采摘机器人平台在紫茄植株垄间以 0.25 m/s 的速度行走, 采集激光雷达点云和IMU数据, 通过Cartographer算法构建栅格地图, 最终变换修正地图, 完成环境地图构建。在图2中, 黑色和红色的9个点对应真实环境中9根直径3 cm的钢管, 钢管竖直向上且其顶端处于同一水平面, 作为地图构建精度试验测量基准。每条垄上按照设定距离固定3根钢管, 使用皮尺测量两两钢管顶端中心点间的距离, 测量出D1~D14的实际距离记为 $t_i (i=1, 2, \dots, 14)$ 。构建出的塑料大棚环境地图如图10所示, 使用GNU图像处理程序(GNU image manipulation program, GIMP)获取D1~D14的图上距离记为 $t'_i (i=1, 2, \dots, 14)$, 则图上距离与实际距离的绝对误差、相对误差和均方根误差计算过程为

$$\varepsilon_i = |t_i - t'_i| \quad (i=1, 2, \dots, 14) \quad (36)$$

$$\delta_i = |\varepsilon_i / t_i| \times 100\% \quad (i=1, 2, \dots, 14) \quad (37)$$

$$X_{\text{rmse}} = \sqrt{\frac{1}{14} \sum_{i=1}^{14} \varepsilon_i^2} \quad (38)$$

式中 ε_i ——图上距离与实际距离的绝对误差, m

δ_i ——图上距离与实际距离的相对误差, %

X_{rmse} ——图上与实际距离的均方根误差, m

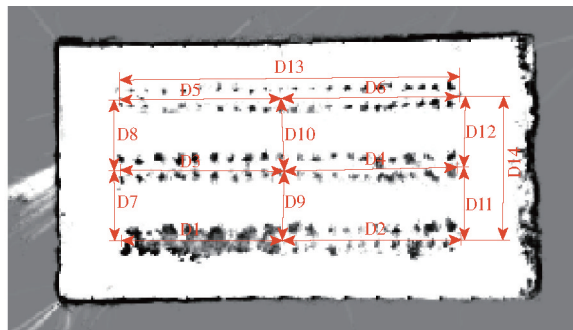


图10 变换修正后的栅格地图

Fig. 10 Raster map after transformation correction

2.2 自主导航系统定位精度试验

采摘机器人平台在塑料大棚中准确地自主导航行走, 需要实时获取精准的全局定位信息。在图2中, $X-Y$ 坐标系作为整个试验场地的全局坐标系, 蓝色箭头代表采摘机器人平台移动方向, 标有序号的蓝色点代表定位精度试验测量点。通过皮尺、水平尺、铅锤、激光水平仪辅助测取标有序号的蓝色点的真实位置坐标 (x, y) , 通过遥控手柄控制采摘机器人平台到达该测量点, 使得采摘机器人平台的几何中心处于测量点的正上方, 读取UWB定位系统直接输出的位置坐标 (x_1, y_1) 以及基于IMU和UWB的塑料大棚实时纠偏定位方法计算的位置坐标 (x_2, y_2) 。采摘机器人平台在 X 方向的定位偏差为横向定位偏差, 在 Y 方向的定位偏差为纵向定位偏差,

作为采摘机器人平台定位精度的评价指标。在 X 方向上, UWB 定位系统直接输出的位置数据偏差 d_x 以及基于 IMU 和 UWB 的塑料大棚实时纠偏定位方法计算的位置数据偏差 d'_x 表示为

$$d_x = x_1 - x \quad (39)$$

$$d'_x = x_2 - x \quad (40)$$

在 Y 方向上, UWB 定位系统直接输出的定位数据偏差 d_y 以及基于 IMU 和 UWB 的塑料大棚实时纠偏定位方法计算的定位数据偏差 d'_y 表示为

$$d_y = y_1 - y \quad (41)$$

$$d'_y = y_2 - y \quad (42)$$

2.3 自主导航系统导航精度试验

将定位精度试验中的定位精度测量点作为导航精度试验中的导航目标点, 采摘机器人平台从起始点分别以速度 0.15、0.30、0.45 m/s 按照预设顺序依次发布 12 个导航目标点, 完成自主导航任务。测量采摘机器人平台在塑料大棚中不同速度不同位置的横向导航偏差、纵向导航偏差和航向偏差数据, 评价导航精度。

采摘机器人平台导航精度测量示意图如图 11 所示。以导航目标点为原点, 采摘机器人平台前进方向为 X 轴正方向, 前进方向左侧为 Y 轴正方向建立直角坐标系, 使用直尺和角度尺测量目标点和实际到达点的距离, 通过平台搭载的 IMU 获取航向偏差数据。以采摘机器人平台的几何中心作为测量基准点, 假设采摘机器人平台导航目标点的坐标为 (x_b, y_b) , 采摘机器人平台导航到达实际点坐标为 (x_a, y_a) , 则横向导航偏差 $X_{\text{deviation}}$ 和纵向导航偏差 $Y_{\text{deviation}}$ 表示为

$$X_{\text{deviation}} = |x_b - x_a| \quad (43)$$

$$Y_{\text{deviation}} = |y_b - y_a| \quad (44)$$

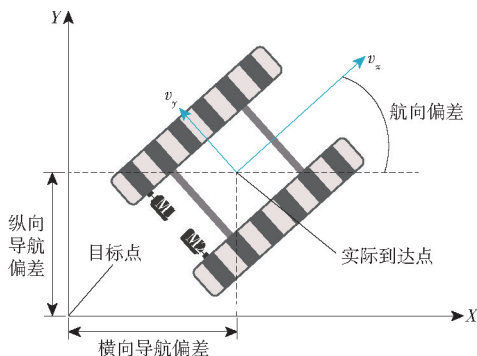


图 11 导航精度测量示意图

Fig. 11 Navigation accuracy measurement diagram

3 试验结果与分析

3.1 塑料大棚建图精度试验结果与分析

该采摘机器人平台构建出经变换修正的紫茄种

植塑料大棚栅格地图, 精度如表 2 所示, 其最大绝对误差、最大相对误差和均方根误差分别为 0.150 m、2.27%、0.067 m。试验结果表明地图整体精度良好, 仅有少数点达到误差最大值, 绝对误差随测量距离的增加而增加, 构建的地图在表示作物和障碍物相对位置关系上具有较高的保真度, 可以满足采摘机器人平台后续的定位和导航需求。

表 2 地图构建精度试验结果

Tab. 2 Mapping accuracy experiment results

距离编号	实际距离/m	图上距离/m	绝对误差/m	相对误差/%
D1	5.000	5.050	0.050	1.00
D2	5.600	5.650	0.050	0.89
D3	5.000	5.100	0.100	2.00
D4	5.600	5.550	0.050	0.89
D5	5.000	5.100	0.100	2.00
D6	5.600	5.650	0.050	0.89
D7	2.200	2.250	0.050	2.27
D8	2.250	2.250	<0.001	<0.01
D9	2.200	2.250	0.050	2.27
D10	2.250	2.250	<0.001	<0.01
D11	2.200	2.250	0.050	2.27
D12	2.250	2.250	<0.001	<0.01
D13	10.600	10.750	0.150	1.42
D14	4.450	4.500	0.050	1.12

3.2 自主导航系统定位精度试验结果与分析

为了验证基于 IMU 和 UWB 的塑料大棚实时纠偏定位方法的有效性, 计算了 UWB 定位系统原始定位数据偏差和本研究的纠偏定位方法计算的定位数据偏差, 结果如表 3 所示。UWB 定位系统原始定位数据横向和纵向定位偏差分别小于等于 0.088、0.080 m, 基于 IMU 和 UWB 的塑料大棚实时纠偏定位方法横向和纵向定位偏差分别小于等于 0.065、0.069 m。与 UWB 原始定位数据相比, 纠偏方法将横向定位精度提高 26.1%, 纵向定位精度提高

表 3 不同定位方法偏差

Tab. 3 Different positioning method deviation m

定位数据来源	统计参数	UWB 定位系统	基于 IMU 和 UWB 的塑料大棚实时纠偏定位方法
X 方向偏差	平均偏差	0.043	0.033
	最大值	0.088	0.065
	最小值	0.004	0.010
	中值	0.042	0.035
	标准差	0.023	0.016
Y 方向偏差	平均偏差	0.044	0.035
	最大值	0.080	0.069
	最小值	0.006	0.006
	中值	0.045	0.029
	标准差	0.024	0.021

13.8%。试验结果表明,基于IMU和UWB的塑料大棚实时纠偏定位方法的定位精度优于UWB定位系统原始定位数据的定位精度,该定位精度能够满足采摘机器人平台的工作要求。

偏差的降低验证了本研究的纠偏定位方法有效补偿了由地面环境引起的采摘机器人平台UWB标签物理位置偏移,从而实现了UWB定位系统输出的原始数据动态纠偏。纠偏后的定位精度能够支持采摘机器人平台更准确地规划路径,提升了导航系统的可靠性和作业成功率。

3.3 自主导航系统导航精度试验结果与分析

为评估自主导航系统的实际性能,在不同运行速度下开展了导航精度试验,结果如表4所示。采摘机器人平台以速度0.15 m/s行驶,横向和纵向导航平均偏差分别为0.040、0.058 m,航向平均偏差为7.659°;以速度0.30 m/s行驶,横向和纵向导航平均偏差分别为0.035、0.070 m,航向平均偏差为8.211°;以速度0.45 m/s行驶,横向和纵向导航平均偏差分别为0.057、0.079 m,航向平均偏差为

表4 不同速度导航精度试验结果

Tab.4 Different speed navigation accuracy experiment data

导航偏差	统计参数	速度/(m·s ⁻¹)		
		0.15	0.30	0.45
横向导航偏差/m	平均偏差	0.040	0.035	0.057
	最大值	0.083	0.082	0.149
	最小值	0.013	0.003	0.001
	中值	0.035	0.034	0.053
	标准差	0.024	0.022	0.039
纵向导航偏差/m	平均偏差	0.058	0.070	0.079
	最大值	0.106	0.259	0.135
	最小值	0.005	<0.001	0.016
	中值	0.060	0.062	0.092
	标准差	0.033	0.069	0.042
航向偏差/(°)	平均偏差	7.659	8.211	5.750
	最大值	10.657	17.779	12.433
	最小值	0.745	1.662	2.063
	中值	8.480	7.586	4.452
	标准差	3.155	4.307	3.606

5.750°。总体上,横向导航偏差、纵向导航偏差和航向偏差平均值分别小于等于0.057 m、0.079 m和8.211°,标准差分别小于等于0.039 m、0.069 m和4.307°。偏差的标准差表明,导航系统在不同速度下均能保持良好的稳定性,单次导航的波动范围在可接受限度内;横纵向偏差和航向偏差会随着速度的变化而变化,但整体上趋于稳定。

试验结果表明,在塑料大棚农业机器人作业场景下,该导航偏差确保了采摘机器人平台不会碰撞垄体或严重偏离目标路线;在不同的运行速度下,均能有效完成塑料大棚环境中的自主导航任务。

4 结论

(1)面向采摘机器人平台在塑料大棚环境中的精准导航需求,提出了一种基于IMU和UWB的塑料大棚实时纠偏定位方法,有效应对了该平台作业时面临的地势高程差异和地面凹凸不平导致定位不精准的问题。

(2)试验结果表明,经变换修正的栅格地图最大绝对误差、最大相对误差和均方根误差分别为0.150 m、2.27%、0.067 m,为采摘机器人平台后续的导航提供了可靠的空间基准。

(3)提出的基于IMU和UWB的塑料大棚实时纠偏定位方法优化了采摘机器人平台定位精度,其横向和纵向定位最大偏差分别降至0.065 m和0.069 m;与UWB原始定位数据相比,纠偏方法将横向定位精度提高26.1%,纵向定位精度提高13.8%。

(4)采摘机器人平台在0.15、0.30、0.45 m/s 3种作业速度下均能保持稳定的自主导航能力,横向导航偏差、纵向导航偏差和航向偏差平均值分别小于等于0.057 m、0.079 m和8.211°,标准差分别小于等于0.039 m、0.069 m和4.307°。

(5)该定位方法有效解决了采摘机器人平台在塑料大棚环境中地面因素造成的UWB定位系统定位不准确问题,提升了其定位和导航的准确性与可靠性,有利于完成高效、精准的自主采摘任务。

参 考 文 献

- [1] 何勇,黄震宇,杨宁远,等. 设施农业机器人导航关键技术研究进展与展望[J]. 智慧农业(中英文), 2024, 6(5): 1-19.
HE Yong, HUANG Zhenyu, YANG Ningyuan, et al. Research progress and prospects of key navigation technologies for facility agricultural robots[J]. Smart Agriculture, 2024, 6(5): 1-19. (in Chinese)
- [2] JIANG S K, WANG S L, YI Z Y, et al. Autonomous navigation system of greenhouse mobile robot based on 3D LiDAR and 2D LiDAR SLAM[J]. Frontiers in Plant Science, 2022, 13: 815218.
- [3] 叶长榄. 关于设施农业温室大棚发展的思考[J]. 福建农机, 2020(4): 6-10, 17.
YE Zhanglan. Thoughts on the development of greenhouse in facility agriculture[J]. Fujian Agricultural Machinery, 2020(4): 6-10, 17. (in Chinese)

- [4] CHOI T, PARK J, KIM J J, et al. Work efficiency analysis of multiple heterogeneous robots for harvesting crops in smart greenhouses[J]. *Agronomy*, 2022, 12(11): 2844.
- [5] LIU K N, YU J R, HUANG Z W, et al. Autonomous navigation system for greenhouse tomato picking robots based on laser SLAM[J]. *Alexandria Engineering Journal*, 2024, 100: 208–219.
- [6] FASIOLO D T, SCALERA L, MASET E, et al. Towards autonomous mapping in agriculture: a review of supportive technologies for ground robotics[J]. *Robotics Autonomous Systems*, 2023, 169: 104514.
- [7] KUNHOTH J, KARKAR A, AL-MAADEED S, et al. Indoor positioning and wayfinding systems: a survey[J]. *Human-centric Computing and Information Sciences*, 2020, 10(1): 1–41.
- [8] QI L, LIU Y, YU Y, et al. Current status and future trends of meter-level indoor positioning technology: a review[J]. *Remote Sensing*, 2024, 16(2): 398.
- [9] JAGELČÁK J, GNAJ P, KUBA O, et al. Determination of turning radius and lateral acceleration of vehicle by GNSS/INS sensor[J]. *Sensors*, 2022, 22(6): 2298.
- [10] HAMZA V, STOPAR B, STERLE O, et al. Observations and positioning quality of low-cost GNSS receivers: a review[J]. *GPS Solutions*, 2024, 28(3): 149.
- [11] LI X X, WANG H D, LI S Y, et al. GIL: A tightly coupled GNSS PPP/INS/LiDAR method for precise vehicle navigation[J]. *Satellite navigation*, 2021, 2(1): 26.
- [12] 张漫, 季宇寒, 李世超, 等. 农业机械导航技术研究进展[J]. *农业机械学报*, 2020, 51(4): 1–18.
ZHANG Man, JI Yuhan, LI Shichao, et al. Research progress of agricultural machinery navigation technology[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2020, 51(4): 1–18. (in Chinese)
- [13] 江帆, 康静静, 皇行涛, 等. 基于多编码器与惯导融合的无轨胶轮车定位方法[J]. *煤炭科学技术*, 2024, 52(增刊2): 284–293.
JIANG Fan, KANG Jingjing, HUANG Xingtao, et al. A positioning method for underground trackless rubber wheel vehicle based on fusion of multiple encoders and strapdown inertial navigation system[J]. *Coal Science and Technology*, 2024, 52(Supp. 2): 284–293. (in Chinese)
- [14] LEE D, JUNG M, YANG W, et al. Lidar odometry survey: recent advancements and remaining challenges[J]. *Intelligent Service Robotics*, 2024, 17(2): 95–118.
- [15] BAI Y H, ZHANG B H, XU N M, et al. Vision-based navigation and guidance for agricultural autonomous vehicles and robots: a review[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2023, 205: 107584.
- [16] WANG R Y, CHEN L H, HUANG Z K, et al. A review on the high-efficiency detection and precision positioning technology application of agricultural robots[J]. *Processes*, 2024, 12(9): 1833.
- [17] TIAN Y L, LIAN Z Z, WANG P H, et al. Application of a long short-term memory neural network algorithm fused with Kalman filter in UWB indoor positioning[J]. *Scientific Reports*, 2024, 14(1): 1925.
- [18] YAN R, HE X N, WANG Z, et al. A compact autonomous inspection system for greenhouse environmental information sensing and three-dimensional visualization[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2025, 231: 109976.
- [19] ZHAO A, WU H J, FAN D, et al. Individual cow recognition based on ultra-wideband and computer vision[J]. *Animals*, 2025, 15(3): 456.
- [20] 刘艳伟, 李思雯, 杨启良, 等. 基于 UWB 定位的智能温室三维温湿度检测系统研究[J]. *农业机械学报*, 2023, 54(9): 414–422.
LIU Yanwei, LI Siwen, YANG Qiliang, et al. Design of intelligent greenhouse three-dimensional temperature and humidity detection system based on UWB positioning[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2023, 54(9): 414–422. (in Chinese)
- [21] 郑航, 叶云翔, 薛向磊, 等. 基于 UWB 和视觉组合导航的设施植保机器人叶菜垄作跟踪控制[J]. *农业工程学报*, 2025, 41(4): 144–152.
ZHENG Hang, YE Yunxiang, XUE Xianglei, et al. Facility plant protection robot based on UWB and visual integrated navigation for leafy vegetable ridge tracking control[J]. *Transactions of the CSAE*, 2025, 41(4): 144–152. (in Chinese)
- [22] NKROW R E, SILVA B, BOSHOF D, et al. NLOS identification and mitigation for time-based indoor localization systems: survey and future research directions[J]. *ACM Computing Surveys*, 2024, 56(12): 1–41.
- [23] WANG S, WANG H Y, WANG G N, et al. Algorithm design to identify targets from multipath ghosts and clutters for SISO IR-UWB radar: incorporating waveform features and trajectory[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2023, 24(2): 2278–2288.
- [24] WANG F, TANG H, CHEN J L. Survey on NLOS identification and error mitigation for UWB indoor positioning[J]. *Electronics*, 2023, 12(7): 1678.
- [25] 毕松, 张国轩, 李志军, 等. 基于测距值修正的温室植保机器人定位方法[J]. *农业机械学报*, 2023, 54(8): 347–358.
BI Song, ZHANG Guoxuan, LI Zhijun, et al. Positioning method of greenhouse plant protection robot based on distance measurement value correction[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2023, 54(8): 347–358. (in Chinese)

- International Journal of Computer Vision, 2018, 126(7): 671 - 688.
- [20] 高芳芳, 武振超, 索睿, 等. 基于深度学习与目标跟踪的苹果检测与视频计数方法[J]. 农业工程学报, 2021, 37(21): 217 - 224.
GAO Fangfang, WU Zhenchao, SUO Rui, et al. Apple detection and counting using real-time video based on deep learning and object tracking [J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(21): 217 - 224. (in Chinese)
- [21] 郭明月, 刘雅晨, 李伟夫, 等. 基于视频跟踪算法的果园猕猴桃产量实时预估[J]. 农业机械学报, 2023, 54(6): 178 - 185.
GUO Mingyue, LIU Yachen, LI Weifu, et al. Real-time production prediction of kiwifruit in orchard based on video tracking algorithm[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(6): 178 - 185. (in Chinese)
- [22] CHEN J, ZHANG M, LU B, et al. A lightweight citrus detection and counting method based on deep learning model[J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2025, 162: 112268.
- [23] 傅隆生, 孙世鹏, VÁZQUEZ - ARELLANO M, 等. 基于果萼图像的猕猴桃果实夜间识别方法[J]. 农业工程学报, 2017, 33(2): 199 - 204.
FU Longsheng, SUN Shipeng, VÁZQUEZ - ARELLANO M, et al. Kiwifruit recognition method at night based on fruit calyx image[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(2): 199 - 204. (in Chinese)
- [24] LIN J, BAI D, XU R, et al. TSBA - YOLO: an improved tea diseases detection model based on attention mechanisms and feature fusion[J]. Forests, 2023, 14(3): 619.
- [25] 李景顺, 刘美, 孟亚男, 等. 应用轻量化 FEB - YOLO 模型的荔枝果实动态识别计数方法[J]. 计算机测量与控制, 2025, 33(2): 229 - 237, 261.
LI Jingshun, LIU Mei, MENG Ya'nan, et al. Dynamic recognition and counting method for litchi fruit using lightweight FEB - YOLO model[J]. Computer Measurement & Control, 2025, 33(2): 229 - 237, 261. (in Chinese)
- [26] 王少聪, 杜肖鹏, 丁小明, 等. 温室巡检机器人关键技术研究进展与展望[J]. 江苏农业科学, 2024, 52(16): 1 - 10.
WANG Shaocong, DU Xiaopeng, DING Xiaoming, et al. Research progress and prospect of key technologies of greenhouse inspection robot[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2024, 52(16): 1 - 10. (in Chinese)
- [27] XU G, LIAO W, ZHANG X, et al. Haar wavelet downsampling: a simple but effective downsampling module for semantic segmentation[J]. Pattern Recognition, 2023, 143: 109819.
- [28] HAN D, WANG Z, XIA Z, et al. Demystify Mamba in vision: a linear attention perspective[J]. arXiv Preprint, arXiv:2405.16605, 2024.
- [29] ZHANG Y, SUN P, JIANG Y, et al. Bytetrack: multi-object tracking by associating every detection box[C] // European Conference on Computer Vision. Cham: Springer Nature Switzerland, 2022: 1 - 21.

~~~~~

(上接第 114 页)

- [26] 张岳阳, 王宇珂, 吕宝轩, 等. 单目视觉定位与 UWB 技术融合的育苗温室移动平台定位方法研究[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2025, 53(5): 146 - 156.  
ZHANG Yueyang, WANG Yuke, LÜ Baoxuan, et al. Research on the localization method of seedling greenhouse mobile platform based on fusion of visual beacons and UWB[J]. Journal of Northwest A&F University(Natural Science Edition), 2025, 53(5): 146 - 156. (in Chinese)
- [27] LONG Z, XIANG Y, LEI X, et al. Integrated indoor positioning system of greenhouse robot based on UWB/IMU/ODOM/LiDAR[J]. Sensors, 2022, 22(13): 4819.
- [28] 张兆国, 朱时亮, 王法安, 等. 基于改进自适应卡尔曼滤波算法的温室 UWB 定位技术[J]. 农业机械学报, 2025, 56(3): 494 - 502, 522.  
ZHANG Zhaoguo, ZHU Shiliang, WANG Faan, et al. UWB greenhouse positioning technology based on improved adaptive Kalman filter algorithm[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(3): 494 - 502, 522. (in Chinese)
- [29] NIU Z, YANG H Z, ZHOU L, et al. Deep learning-based ranging error mitigation method for UWB localization system in greenhouse[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2023, 205: 107573.
- [30] LI M H, GAO H Y, ZHAO M X, et al. Development and experimentation of a real-time greenhouse positioning system based on IUKF - UWB[J]. Agriculture, 2024, 14(9): 1479.
- [31] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 中华人民共和国国家质检监督检验检疫总局. GB/T 51057—2015 种植塑料大棚工程技术规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 2015.
- [32] GUO H P, LI Y, WANG H, et al. Research on autonomous navigation system of greenhouse electric crawler tractor based on LiDAR[J]. Frontiers in Plant Science, 2024, 15: 1377269.