

密植果园作业机器人行间定位方法*

周俊^{1,2} 胡晨¹

(1. 南京农业大学江苏省智能化农业装备重点实验室, 南京 210031; 2. 农业部现代农业装备重点实验室, 南京 210014)

摘要: 在密植果园的果树行间, 由于浓密树冠对卫星信号的遮挡, 目前在开阔环境中成功应用的农业机械卫星导航定位方式存在失效问题。而单纯利用里程计在果园进行定位, 又存在误差累积的难题。为此, 以农业机器人驶入果树行前的初始位置点为原点, 建立世界坐标系。利用激光雷达扫描作业空间中果树行两边的树干, 根据圆弧聚类方法计算树干中心点, 并记录在世界坐标系中。而后, 在机器人运动过程中再实时检测果树树干中心点, 并与先前时刻记录在世界坐标系中的树干中心点进行匹配, 利用匹配结果校正里程计数据计算出的机器人位置和航向, 以实现在密植果树行间对农业机器人进行准确定位。10次重复实验表明, 农业机器人在世界坐标系的 x 和 y 方向上定位误差的标准差都约为0.08 m, 精度能够满足密植果园作业机器人的应用需求。

关键词: 密植果园 农业机器人 行间定位 激光雷达

中图分类号: TP242.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2015)11-0022-07

Inter-row Localization Method for Agricultural Robot Working in Close Planting Orchard

Zhou Jun^{1,2} Hu Chen¹

(1. Key Laboratory of Intelligent Agricultural Equipment in Jiangsu Province, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210031, China

2. Key Laboratory of Modern Agricultural Equipment, Ministry of Agriculture, Nanjing 210014, China)

Abstract: Global navigation satellite system for localization of agricultural machineries has been successfully used for many years in a broad-acre environment. However, it will fail to work in a close planting orchard because navigation satellite signals are often interfered by dense tree canopies. Moreover, localization by only odometers can lead to a large accumulated error. Therefore, firstly the position of an agricultural robot before entering inter-row of the close planting orchard was taken as an original point and a world coordinate system was established. A laser radar was applied to scan trunks on the both sides of the robot and the center points of trunks were extracted through circular clustering. The position values of these center points were saved in the world coordinate system. Then during the moving of the robot, the center points of trunks detected by the laser radar in real time were matched with those which had been saved previously in the world coordinate system. Matching results were applied to correct the robot position and heading angle which had been measured with only odometers. In this way the agriculture robot was able to locate itself accurately in the inter-row of the close planting orchard. Repeated experimental results showed that the robot localization standard errors in both x and y directions in the world coordinate system were about 0.08 m. The localization accuracy can meet requirements when the agricultural robot is applied in the close planting orchard. Moreover, the successful inter-row localization is the premise of global positioning and navigation of the robot working in the orchard.

Key words: Close planting orchard Agricultural robot Inter-row localization Laser radar

收稿日期: 2015-04-28 修回日期: 2015-05-21

* 国家自然科学基金资助项目(31471419)和农业部现代农业装备重点实验室开放课题资助项目(201302003)

作者简介: 周俊, 教授, 博士生导师, 主要从事农业机器人、机器视觉与模式识别研究, E-mail: zhoujun@njau.edu.cn

引言

机器人定位是移动机器人应用的基础问题,是实现自主导航的前提条件^[1]。密植果园中作业的农业机器人也是这样,定位信息可以帮助机器人预判地头 and 规划路径,实现地头转向,自主驶向下一行。同时,定位信息结合果树株距信息还可以帮助机器人预判果树位置,以提高机器人检测果树树干的精度和植保等作业效果。

全球导航卫星系统(Global navigation satellite system, GNSS)作为一种成熟的农业机械定位导航方法在宽阔的大田环境已经被成功应用了多年。但是许多学者的研究表明,果园环境中浓密的树冠会严重遮挡卫星信号,GNSS 变得不再可靠^[2-11]。因此,部分学者建议在密植果园自主作业的农业机器人,应当谋求不依赖于 GNSS(GNSS-free)的定位与导航方式^[2-8]。利用里程计定位可以不依赖 GNSS,但是误差积累是单纯里程计定位的固有难题。

目前国外关于果园自主作业机器人的定位研究已经取得了部分成果,研究中使用的主要传感器大多为激光雷达^[3-4,7-9,12-13]。Freitas 等与 Hansen 等利用不同种类的派生卡尔曼滤波算法进行了机器人的定位研究,但是此算法主要适用于果树行类似于“树墙”形式的果园^[3-4,12]。Jagbrant 等利用先验地图与隐马尔科夫模型实现了机器人的定位,但是研究尚缺乏合适的数据库更新机制来解决果树随时间的外观变化^[7-8]。在同时定位与地图创建(Simultaneous localization and map building, SLAM)研究中,环境通常由全局坐标系下的路标位置来表示,因而部分学者将果树树干作为路标,进行了相关的 SLAM 研究^[9,13]。但是存在遇到诸如缺树等情况时,算法无法自动运行,需要人为干预^[9]。并且方法的实现要求树干粗大、颜色与环境背景色相差较大,应用有一定的局限性^[13]。

国内目前关于果园自主作业机器人的相关研究大多集中在一行内自动导航,对地头自动转向关注较少^[10,14],因而对机器人精确定位研究不多。陈军等^[15-17]利用激光雷达检测果树位置信息,并设置了直线和曲线两种果树行实验场景验证了系统的性能。薛金林等^[18]应用激光雷达研究了农业机器人在有行株距的果树行间与无株距的果树行间的导航性能,特别是一侧存在行缺失时的机器人导航性能。

为此,本文提出一种密植果园作业机器人行间定位方法,结合地头 GNSS 定位或者地头人工标识定位实现机器人果园作业全局定位导航。

1 果树树干中心点确定

1.1 树干圆弧特征检测及中心确定

许多果树的树干可以认为是近似的圆柱体,激光雷达扫描到树干的外表面,将形成近似圆弧形的聚类点簇轮廓。根据这些圆弧形聚类点簇,经过一定的几何推导,完全可以确定树干的中心坐标位置以及半径,得到树干的圆弧特征参数^[19]。

首先利用基于动态阈值欧氏距离的区域分割法对激光雷达的一帧原始数据进行数据聚类^[20]。

$$S_n = (\rho_i, \alpha_i) \quad (i = 0, 1, \dots, n; \alpha_i = i\Delta\alpha) \quad (1)$$

式中 ρ_i ——第 i 个扫描点的距离

α_i ——第 i 个扫描点的角度

$\Delta\alpha$ ——激光雷达的角度分辨率

n ——每帧数据中扫描点的总数目

由于树干的粗细和到机器人的距离均有所不同,这将造成树干圆弧聚类中点的数目 N 有所变化,因而当激光雷达数据聚类完成后,若某个聚类中的点数在 $[N_{\min}, N_{\max}]$ 范围之内,便可认为该聚类为可能的树干圆弧聚类。

对于可能的树干圆弧聚类,需要进一步确定可能的树干中心位置、半径等特征参数,以此判断可能的树干圆弧聚类是否属于树干,为此采用一种圆弧特征检测方法进行确认^[21]。如图 1 所示,定义树干中心 B 点在激光雷达坐标系 $X_L O_L Y_L$ 中的极坐标为 (ρ_B, α_B) 。

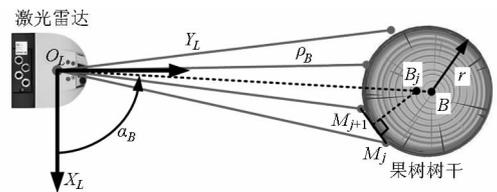


图 1 树干中心的提取

Fig. 1 Extraction of trunk center

该方法首先应根据可能树干圆弧聚类中的 N 个连续扫描点 $M_j(\rho_j, \alpha_j)$ ($j = 1, 2, \dots, N$) 求得

$$\alpha_B = \sum_{j=1}^N \omega_j \alpha_j \quad (2)$$

其中

$$\sum_{j=1}^N \omega_j = 1$$

式中 ω_j ——加权系数,与 ρ_j 成反比

然后以相邻 2 个扫描点 M_j, M_{j+1} 为端点做线段 $M_j M_{j+1}$ 的中垂线,并与从激光雷达原点 O_L 点发出、倾角为 α_B 的射线相交,设交点为 $B_j(\rho_{B_j}, \alpha_B)$,根据聚类当中两两相邻扫描点求出的各 ρ_{B_j} 值,综合处理便可以求出 ρ_B 。

在确定可能的树干中心位置后,将其中心到 n 个

扫描点的距离进行加权平均,求出可能的树干聚类的半径精确估计值 r 。考虑到果树树干半径、外形等有一定的随机波动性,因此设定半径范围 $[r_{\min}, r_{\max}]$,如果 $r \in [r_{\min}, r_{\max}]$,就将可能的树干聚类确定为树干聚类,并记录下该树干的中心位置 (ρ_B, α_B) 。

1.2 树干中心在世界坐标系中的位置

为了确定机器人在果树行间的位置,需要将激光雷达检测出的作业空间中树干中心点位置转换并记录在世界坐标系 $X_w O_w Y_w$ 之中。由于运动初始时刻机器人位于果园地头尚未进入密植果园行间,树冠对卫星信号的遮挡可能并不严重,这时可以用GNSS方法确定果园导航世界坐标系;如果果园地头树冠的遮挡与行间同样严重时,也可以采用人工在地头设置固定标识的形式来确定机器人导航世界坐标系。某一果园的世界坐标系建立后,它是唯一的,无需在不同作业中加以改变。由于本文中暂只考虑机器人在行间定位,尚未涉及到果园全局定位,这里将世界坐标系选择与运动初始时刻机器人坐标系 $X_R O_R Y_R$ 相重合,由机器人初始时刻位姿决定。同时,定义机器人坐标系与激光雷达坐标系 $X_L O_L Y_L$ 重合。

因此机器人初始位姿下激光雷达检测到的树干中心的坐标可以直接转换到世界坐标系中。将激光雷达检测到的树干中心 (ρ_B, α_B) 由极坐标形式转化为直角坐标形式 (x_B, y_B)

$$\begin{cases} x_B = \rho_B \cos \alpha_B \\ y_B = \rho_B \sin \alpha_B \end{cases} \quad (3)$$

则在初始位姿下,机器人检测到的作业空间中的树干中心点位置可以表示为集合

$$T_{\text{Trunk}} = \{(x_{1,t}, y_{1,t}), (x_{2,t}, y_{2,t}), \dots, (x_{i,t}, y_{i,t}), \dots\} \quad (4)$$

式中 i ——检测到的树干中心点序号

$(x_{i,t}, y_{i,t})$ ——树干 i 的中心点在世界坐标系中的位置坐标

由于激光雷达的扫描范围一般较大,在农业机器人运动初始时刻建立的这个集合中存储的树干所覆盖的作业空间范围也比较大。因此,随后机器人在果树行间运动过程中,只有当机器人运动超越集合覆盖的空间范围才进行此集合的更新,这样既可以减小计算量,同时也可减少更新过程引入的累积误差。

2 机器人行间定位方法

行间定位时,以机器人驶入果树行前的初始时刻建立世界坐标系。利用激光雷达检测果树行作业空间中的树干位置,在运动过程中将实时检测的树

干中心点与先前时刻已经存储在世界坐标系中的树干中心点进行匹配,并应用匹配结果校正根据里程计数据计算出的机器人位置与航向,以在线获取准确的机器人行间定位信息。

2.1 定位流程

由于机器人初始时刻位姿在世界坐标系已知,那么本研究行间定位过程就是,首先机器人在密植果树行间,从其 $k-1$ 时刻的已知位姿出发,辅助以里程计短途航迹推算的信息,得到机器人 k 时刻的位姿预测值;然后,将运动过程中实时检测到的部分树干中心点位置,由机器人坐标系转换到世界坐标系当中,并与前面已经记录在世界坐标系当中的树干中心点位置进行匹配;最后利用匹配结果实现对机器人位姿预测值的校正,得出机器人 k 时刻的位姿,进而完成机器人在密植果树行间位置的持续确定。其实现过程如图2所示。

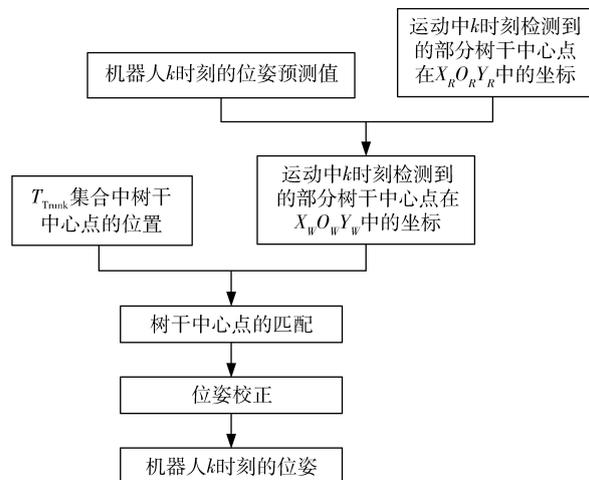


图2 定位流程图

Fig. 2 Flow chart of localization

2.2 基于里程计的机器人位姿预测模型

本研究使用的机器人实验平台采用2个前轮独立驱动,差速转向,其基于里程计的运动学模型如图3所示。机器人位姿可以用向量 $X_r = (x_r, y_r, \theta_r)^T$ 表示,其中 (x_r, y_r) 表示机器人坐标系原点 O_R 在世界坐标系中的坐标,即机器人的位置; θ_r 为机器人坐标系 Y_R 轴与世界坐标系 X_w 轴之间的夹角。机器人在 $k-1$ 时刻到 k 时刻间隔内运动距离和航向角的变化值分别为 $\Delta D(k)$ 和 $\Delta \theta(k)$ 。

$$\begin{cases} \Delta D(k) = \frac{\Delta d_L + \Delta d_R}{2} \\ \Delta \theta(k) = \frac{\Delta d_R - \Delta d_L}{a} \end{cases} \quad (5)$$

式中 Δd_L ——左轮运动距离

Δd_R ——右轮运动距离

a ——两轮间距离

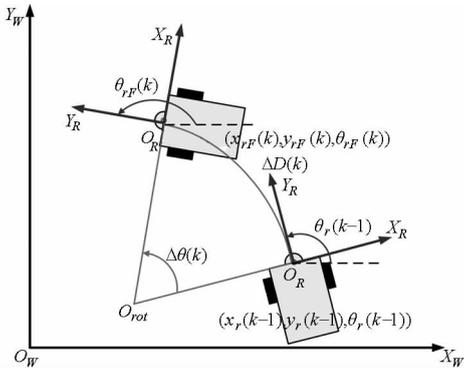


图 3 基于里程计的机器人位姿预测模型

Fig. 3 Robot pose prediction model based on odometers

由于轮胎的滑移等因素的影响,式(5)的计算结果只是机器人位姿变化真实值的近似。令 $\mathbf{u}(k) = (\Delta D(k), \Delta\theta(k))$, 则基于里程计的机器人位姿预测模型可以表示为

$$\mathbf{X}_{rF}(k) = f(\mathbf{X}_r(k-1), \mathbf{u}(k)) \quad (6)$$

式中 $\mathbf{X}_{rF}(k)$ ——机器人 k 时刻位姿的预测值

$\mathbf{X}_r(k-1)$ ——机器人 $k-1$ 时刻位姿

式(6)中得到的机器人位姿预测值由于轮胎打滑等因素的干扰,无法作为 k 时刻机器人的定位值,必须进一步通过校正来消除这些干扰引入的误差。

此外,由于编码器噪声的影响,机器人在直线行驶时,也会出现极小的 $\Delta\theta(k)$ 。为了更加精确地预测机器人 k 时刻的位姿值,同时也可减轻系统的计算负担,设置阈值 $T_A = 1^\circ$, 确保机器人直线行驶时使用直线模型

$$\begin{aligned} \mathbf{X}_{rF}(k) = f(\mathbf{X}_r(k-1), \mathbf{u}(k)) = & \\ \begin{bmatrix} x_r(k-1) + \Delta D(k) \cos\theta_r(k) \\ y_r(k-1) + \Delta D(k) \sin\theta_r(k) \\ \theta_r(k) \end{bmatrix} & \\ (\lvert \Delta\theta(k) \rvert \leq T_A) & \end{aligned} \quad (7)$$

而在差速转向时使用圆弧模型

$$\mathbf{X}_{rF}(k) = f(\mathbf{X}_r(k-1), \mathbf{u}(k)) =$$

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} x_r(k-1) + \frac{\Delta D(k)}{\Delta\theta(k)} (\sin(\theta_r(k-1) + \Delta\theta(k)) - \sin\theta_r(k-1)) \\ y_r(k-1) - \frac{\Delta D(k)}{\Delta\theta(k)} (\cos(\theta_r(k-1) + \Delta\theta(k)) - \cos\theta_r(k-1)) \\ \theta_r(k-1) + \Delta\theta(k) \end{bmatrix} & \\ (\lvert \Delta\theta(k) \rvert > T_A) & \end{aligned} \quad (8)$$

2.3 树干中心点匹配

为了完成对机器人 k 时刻的位姿校正,首先将机器人在果树行间运动过程中实时检测到的树干中心点位置由机器人坐标系转换到世界坐标系中

$$\begin{bmatrix} x_{wi} \\ y_{wi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin\theta_{rF}(k) & \cos\theta_{rF}(k) \\ -\cos\theta_{rF}(k) & \sin\theta_{rF}(k) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{ri} \\ y_{ri} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x_{rF}(k) \\ y_{rF}(k) \end{bmatrix} \quad (9)$$

式中 (x_{wi}, y_{wi}) ——树干 i 的中心点在世界坐标系中的坐标

$(x_{rF}(k), y_{rF}(k), \theta_{rF}(k))^T$ —— k 时刻机器人位姿的预测值

(x_{ri}, y_{ri}) ——树干 i 的中心点在机器人坐标系中的坐标

这样就可以得到机器人在果树行间运动过程中 k 时刻检测到的部分树干中心点在世界坐标系中的坐标。由于式(4)树干中心点集合 T_{Trunk} 中存储的数据也是树干中心在世界坐标系中的坐标,这样两者之间就存在部分数据之间的关联对应,当然由于模型和里程计的误差,两者之间不可能完全重合,只会近似相等,因而需要进行两者之间的匹配。

为了进行匹配,需要设置阈值 T_R , 或者称为关联门。门限阈值的大小直接影响匹配的效果。门限过小,套不住可能的树干;门限过大,又抑制不了其它树干或无关干扰。关联门目前有环形、椭圆形、矩形和截尾扇形等多种类型。本文参考文献[9]中的方法,机器人在 k 时刻检测到的树干 i 的中心与集合 T_{Trunk} 中树干 j 的中心的距离为

$$d_{i,j} = \sqrt{(x_{wi} - x_{j,t})^2 + (y_{wi} - y_{j,t})^2} \quad (10)$$

式中 (x_{wi}, y_{wi}) —— k 时刻检测到的树干 i 的中心点坐标

$(x_{j,t}, y_{j,t})$ ——集合 T_{Trunk} 中树干 j 的中心点坐标

若满足 $d_{i,j} \leq T_R$, 则认为 k 时刻检测到的树干 i 与集合 T_{Trunk} 中的树干 j 之间是匹配的。由于机器人在果树行间行驶,无需对 k 时刻机器人检测到的所有树干进行匹配计算,只需从机器人检测到的左右侧树干当中各取一棵与集合 T_{Trunk} 中存储的树干中心位置匹配即可。

2.4 机器人位姿校正方法

树干中心点匹配之后,由于集合 T_{Trunk} 中存储的树干中心点在世界坐标系中的位置值相对于式(9)给出的机器人在预测位姿上计算出的树干坐标更加准确,因此,就可以用集合 T_{Trunk} 中存储的机器人左右侧各一棵树干的中心点位置坐标 $(x_{l,t}, y_{l,t})$ 与 $(x_{r,t}, y_{r,t})$ 来校正机器人在 k 时刻的位姿预测值,以获取 k 时刻机器人在果树行间的准确定位。

机器人在运动过程中利用激光雷达在 k 时刻检测到的匹配树干中心在机器人坐标系中的极坐标为 (ρ_1, α_1) 与 (ρ_2, α_2) 。位姿校正原理如图 4 所示,假设匹配的左侧树干在下,右侧树干在上,即 $y_{l,t} < y_{r,t}$, 过左侧树干的中心作平行于 X_W 的平行线,交 ρ_1 于点 A 。

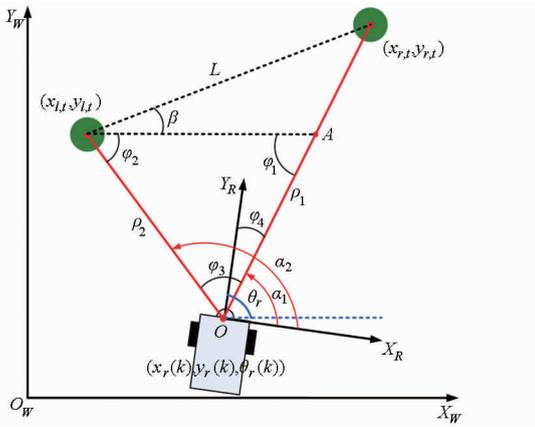


图4 机器人位姿校正示意图

Fig. 4 Schematic diagram of robot pose correction

根据 $(x_{l,t}, y_{l,t})$ 和 $(x_{r,t}, y_{r,t})$, 由式(11)可得集合 T_{Trunk} 中两树干中心点之间的距离 L , 由式(12)可得角 β 。根据余弦定理, 由式(13)和(14)可分别求出 $(\beta + \varphi_2)$ 和 φ_3 。

$$L = \sqrt{(x_{l,t} - x_{r,t})^2 + (y_{l,t} - y_{r,t})^2} \quad (11)$$

$$\beta = \arctan\left(\frac{|y_{l,t} - y_{r,t}|}{|x_{l,t} - x_{r,t}|}\right) \quad (12)$$

$$\beta + \varphi_2 = \arccos\left(\frac{L^2 + \rho_2^2 - \rho_1^2}{2L\rho_2}\right) \quad (13)$$

$$\varphi_3 = \arccos\left(\frac{\rho_1^2 + \rho_2^2 - L^2}{2\rho_1\rho_2}\right) \quad (14)$$

式(13)减去式(12)便可得角 φ_2 。而角 φ_1 的计算式为

$$\varphi_1 = 180^\circ - \varphi_2 - \varphi_3 \quad (15)$$

Y_R 轴与 ρ_1 的夹角为 φ_4 , 由于过左侧树干中心作的直线平行于世界坐标系的 X_W 轴, 且激光雷达是从机器人坐标系的 X_R 轴开始扫描的, 因而

$$\theta_r = \varphi_1 + \varphi_4 \quad (16)$$

$$\varphi_4 = 90^\circ - \alpha_1 \quad (17)$$

这样, 便可以求出机器人在运动过程中 k 时刻的位姿校正值

$$\begin{cases} x_r(k) = x_{l,t} + \rho_2 \cos\varphi_2 \\ y_r(k) = y_{l,t} - \rho_2 \sin\varphi_2 \\ \theta_r(k) = \varphi_1 + 90^\circ - \alpha_1 \end{cases} \quad (18)$$

当左侧树干在上, 右侧树干在下, 位姿校正公式推导类似, 不再赘述。至此便完成了农业移动机器人在密植果树行间的定位过程。

3 实验及结果分析

实验中使用的机器人平台以及模拟密植果园场景如图5所示。场景里两行树中, 左侧为樱花树, 右侧为枫树, 树冠交错, 较为浓密, 树干粗细不一。地面为松软的草地, 基本平整, 部分路段还有坑洼的现象。无论树干特征、树干排列, 还是从树冠特点来

说, 该场景与真实密植果园环境都几乎一致, 能够用来检验本文算法的有效性。



图5 实验场景与平台

Fig. 5 Experimental scene and robot platform

移动机器人平台采用两前轮独立驱动, 差速转向, 两后轮随动的结构。机器人前面安装有激光雷达, 以检测作业空间中的树干位置。实验过程中, 机器人在树木行间运动, 利用前述方法自动实现自身的实时定位, 并利用后部携带的划线装置, 在地面上记录下机器人的真实运动轨迹。将人工测量该轨迹所得到的结果作为机器人定位的测量值。

该场景中树干半径平均值为 0.05 m , 激光雷达型号为 SICK LMS511, 实验中激光雷达的分辨率设置为 0.1667° , 扫描范围为 $0^\circ \sim 180^\circ$, 安装高度距离地面 0.6 m 。生成 T_{Trunk} 集合时激光雷达的检测范围设置为 $X_L \in [-2.5 \text{ m}, 2.5 \text{ m}]$, $Y_L \in [0 \text{ m}, 20 \text{ m}]$ 。而在运动过程中进行定位时激光雷达的检测范围设置为 $X_L \in [-3 \text{ m}, 3 \text{ m}]$, $Y_L \in [0 \text{ m}, 10 \text{ m}]$ 。机器人初始位姿为 $(0, 0, 90^\circ)$, 运动过程中机器人的平均速度设置为 0.5 m/s 。实验程序在 VC++6.0 平台下开发, 以 500 ms 采样间隔实时采集信息并运行算法。在该场景进行 10 次重复性实验, 每次机器人均从同一初始位姿出发。

图6为第1次实验的定位结果。图中的黑点代表本文算法所检测出的 T_{Trunk} 集合中树干中心点的

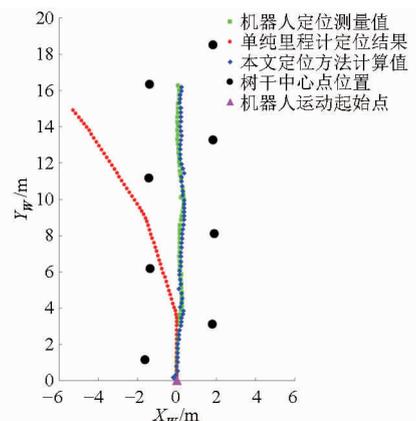


图6 第1次实验的结果

Fig. 6 Results of 1st experiment

位置。可见,单纯利用里程计在此环境进行定位,最终的定位结果超出了树木行,远远偏离了机器人真实轨迹。这主要是由于该场景的路况不佳,机器人会发生颠簸、打滑现象,里程计存在较大的累积误差造成的。而应用本文的定位方法所获得的结果,与机器人定位测量值接近重合,效果理想。

用 X_W 、 Y_W 方向机器人定位测量值分别减去本

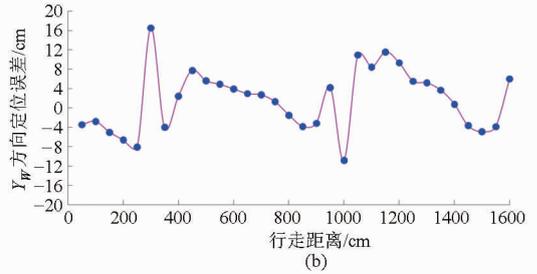
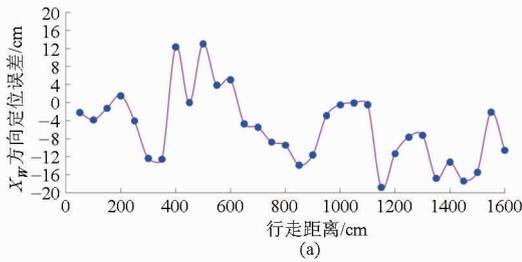


图 7 第 1 次实验定位误差

Fig. 7 Localization error of 1st experiment

由 10 次重复实验得到的统计结果如表 1、2 所示。可见,在 10 次实验中, X_W 方向上定位的最大误差不超过 0.21 m,定位误差的标准差平均值为 0.08 m; Y_W 方向上定位的最大误差不超过 0.18 m,定位误差的标准差平均值为 0.08 m。这与 Freitas 等^[3-4]在果园环境下所取得的机器人定位误差在 0.17 m 到 0.23 m 之间很接近。

表 1 X_W 方向上的定位误差

Tab. 1 Localization error in X_W direction m

次序	最大误差	平均误差	标准差
1	-0.19	-0.06	0.08
2	-0.21	-0.06	0.08
3	0.20	0.04	0.08
4	-0.21	-0.03	0.08
5	-0.20	-0.05	0.07
6	0.21	0.00	0.09
7	0.20	0.03	0.09
8	0.18	0.02	0.08
9	0.19	-0.06	0.07
10	-0.18	-0.05	0.07
平均		-0.02	0.08

文定位方法的相应计算值得到 2 个方向上的定位误差。图 7 为第 1 次实验的定位误差图,由图可见, X_W 、 Y_W 方向上的定位误差随着运动距离的增加均表现出在 0 值附近随机分布。其中,由于激光雷达在运动过程中扫描到的树干截面处圆弧特性各异,从而引入的树干中心点位置计算误差是产生系统定位误差的一个重要原因。

准差平均值为 0.08 m; Y_W 方向上定位的最大误差不超过 0.18 m,定位误差的标准差平均值为 0.08 m。因此,所取得的机器人定位精度和重复性能够满足机器人在密植果树行间作业的需求。

表 2 Y_W 方向上的定位误差

Tab. 2 Localization error in Y_W direction m

次序	最大误差	平均误差	标准差
1	0.17	0.02	0.06
2	0.14	-0.01	0.07
3	0.15	0	0.08
4	0.15	-0.01	0.09
5	-0.16	-0.07	0.07
6	-0.12	-0.04	0.07
7	0.15	-0.06	0.06
8	0.18	-0.02	0.08
9	-0.15	-0.05	0.08
10	0.15	0.03	0.09
平均		-0.02	0.08

(3)应用行间定位数据,机器人可以预判是否接近果树行的尽头,提前调整运动参数做好自主驶入下一行的准备。此外,准确的行间定位信息结合果树行株距数据,可以计算机器人相对于果树的方位,不仅可以增加激光传感器检测不同树干的能力,特别是对易被漏检的较细树干,而且也能够改善诸如果园植保等作业的效果。

(4)将行间定位信息与地头机器人定位结果结合起来,可以实现果园作业机器人全局定位,实现完全意义上的果园作业机器人自主导航。在地头,由于树冠遮挡作用小,可以借助 GNSS 定位方式,也可以在地头设置人工定位标识,这将是今后的研究目标。

4 结论

(1)利用机器人运动过程中激光雷达实时检测到的树干中心点,与记录先前时刻已经在世界坐标系中存储的树干中心点进行匹配,再利用匹配结果实时校正根据里程计数据计算出的机器人位姿值,实现了密植果园作业机器人在行间的精确定位。

(2)10 次重复实验结果显示,机器人在 X_W 方向上定位的最大误差不超过 0.21 m,定位误差的标

参 考 文 献

- 1 Thrun S, Fox D, Burgard W, et al. Robust Monte Carlo localization for mobile robots[J]. *Artificial Intelligence*, 2001, 128(1-2): 99-141.
- 2 Subramanian V, Burks T F, Arroyo A A. Development of machine vision and laser radar based autonomous vehicle guidance systems for citrus grove navigation[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2006, 53(2): 130-143.
- 3 Freitas G, Zhang J, Hamner B, et al. A low-cost, practical localization system for agricultural vehicles[C]//*Intelligent Robotics and Applications: 5th International Conference, ICIRA 2012*, 2012: 365-375.
- 4 Libby J, Kantor G. Deployment of a point and line feature localization system for an outdoor agriculture vehicle[C]//*2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 2011: 1565-1570.
- 5 Andersen J C, Ravn O, Andersen N A. Autonomous rule-based robot navigation in orchards[C]//*Intelligent Autonomous Vehicles*, 2010, 7(1): 43-48.
- 6 Hamner B, Singh S, Bergerman M, et al. Improving orchard efficiency with autonomous utility vehicles[C]//*2010 ASABE Annual International Meeting*. ASABE Paper 1009415, 2010.
- 7 Bargoti S, Underwood J P, Nieto J I, et al. A pipeline for trunk localisation using LiDAR in trellis structured orchards[C]//*Field and Service Robotics: results of the 8th International Conference*, 2015: 455-468.
- 8 Mejias J, Corke P, Roberts J. *Field and service robotics: Results of the 9th international conference* [M]. Heidelberg: Springer, 2015:455-483.
- 9 Christiansen M P. *Localization in orchards using extended Kalman filter for sensor-fusion* [D]. Odense: University of Southern Denmark, 2011.
- 10 蒋浩然, 陈军, 王虎, 等. 移动机器人自动驾驶技术研究进展[J]. *西北农林科技大学学报: 自然科学版*, 2011, 39(12): 207-213.
Jiang Haoran, Chen Jun, Wang Hu, et al. Research progress of automatic navigation technology for orchard mobile robot [J]. *Journal of Northwest A&F University: Natural Science Edition*, 2011, 39(12): 207-213. (in Chinese)
- 11 慕军营, 戚树腾, 陈军, 等. 自动驾驶系统在农业中的应用及果园适用性分析[J]. *农机化研究*, 2014(7): 6-12.
Mu Junying, Qi Shuteng, Chen Jun, et al. Application of automatic navigation system in agricultural machinery and the analysis of applicability in orchard[J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2014(7): 6-12. (in Chinese)
- 12 Hansen S, Bayramoglu E, Andersen J C, et al. Derivative free Kalman filtering used for orchard navigation[C]//*2010 13th Conference on Information Fusion (FUSION)*, 2010: 1-8.
- 13 Auat Cheein F, Steiner G, Perez Paina G, et al. Optimized EIF-SLAM algorithm for precision agriculture mapping based on stems detection[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2011, 78(2): 195-207.
- 14 姬长英, 周俊. 农业机械导航技术发展分析[J]. *农业机械学报*, 2014, 45(9): 44-54.
Ji Changying, Zhou Jun. Current situation of navigation technologies for agricultural machinery [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2014, 45(9): 44-54. (in Chinese)
- 15 刘沛, 陈军, 张明颖. 基于激光导航的果园拖拉机自动控制系统[J]. *农业工程学报*, 2011, 27(3): 196-199.
Liu Pei, Chen Jun, Zhang Mingying. Automatic control system of orchard tractor based on laser navigation[J]. *Transactions of the CSAE*, 2011, 27(3): 196-199. (in Chinese)
- 16 陈军, 蒋浩然, 刘沛, 等. 果园移动机器人曲线路径导航控制[J]. *农业机械学报*, 2012, 43(4): 179-182.
Chen Jun, Jiang Haoran, Liu Pei, et al. Navigation control for orchard mobile robot in curve path [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2012, 43(4): 179-182. (in Chinese)
- 17 戚树腾, 聂森, 陈军, 等. 基于激光导航的果园移动机器人自动控制系统[J]. *农机化研究*, 2015(10): 8-12.
Qi Shuteng, Nie Sen, Chen Jun, et al. Automatic control system of orchard mobile robot based on laser navigation [J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2015(10): 8-12. (in Chinese)
- 18 薛金林, 张顺顺. 基于激光雷达的农业机器人导航控制研究[J]. *农业机械学报*, 2014, 45(9): 55-60.
Xue Jinlin, Zhang Shunshun. Navigation of an agricultural robot based on laser radar [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2014, 45(9): 55-60. (in Chinese)
- 19 伍舜喜, 杨明. 基于自然柱状特征地图的智能车定位[J]. *上海交通大学学报*, 2008, 42(10): 1745-1748.
Wu Shunxi, Yang Ming. Natural pole-map based localization for intelligent vehicles[J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University*, 2008, 42(10): 1745-1748. (in Chinese)
- 20 赵帅锋, 顿向明, 钱钧, 等. 基于激光雷达的大型移动平台定位[J]. *机器人*, 2011, 33(1): 77-83.
Zhao Shuaifeng, Dun Xiangming, Qian Jun, et al. Localization for large mobile platform using laser radar[J]. *Robot*, 2011, 33(1): 77-83. (in Chinese)
- 21 钱钧, 杨汝清, 王晨, 等. 基于路标的智能车辆定位[J]. *上海交通大学学报*, 2008, 41(6): 894-898.
Qian Jun, Yang Ruqing, Wang Chen, et al. Landmark based localization of intelligent vehicle [J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University*, 2008, 41(6): 894-898. (in Chinese)