

基于直线检测的航向角误差校正方法^{*}刘 诚 李金阳 贾 娜 花 军
(东北林业大学机电工程学院 哈尔滨 150000)

摘 要: 提出了一种基于直线检测模型的多传感器数据融合航向角随机误差校正方法,旨在提高农林环境下低成本传感器组成的定位平台的精度。该方法通过调整直线检测阈值来实现状态的动态调整,以提高导航系统的鲁棒性和精确性。再将多传感器数据通过卡尔曼滤波融合,实现航向角随机误差的校正。试验结果表明,该方法在不同路径和速度下能有效降低航向角误差提高定位精度。在直线行进试验中,本方法的定位精度保持在 5 cm 以内,航向角误差在 5°以内。在矩形行进试验中,本方法的轨迹与差分 RTK 方法相近,平均误差仅为 2.7 cm,标准差为 3.9 cm。这一航向角校正方法为农业机械和车辆环境中的自主操作提供了有力支持。它能够适应不同的环境条件,提高导航系统的性能和测量准确性。

关键词: 航向角校正;直线检测;农林环境

中图分类号: TP212 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.4030

Yaw angle error correction method based on line detection

Liu Cheng Li Jinyang Jia Na Hua Jun

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Northeast Forestry University, Harbin 150000, China)

Abstract: This paper presents a yaw angle random error correction method based on a line detection model and multisensor data fusion, aimed at enhancing the accuracy of a low-cost sensor-equipped positioning platform in agricultural and forestry environments. The method achieves dynamic state adjustment by tuning the line detection threshold to improve the robustness and precision of the navigation system. Subsequently, it fuses multisensor data using Kalman filtering to correct yaw angle random errors. Experimental results demonstrate the method's effectiveness under various paths and velocities. In straight-line progress experiments, the positioning accuracy of this method remains within 5 cm, with a yaw angle error within 5°. In rectangular progress experiments, the trajectories closely resemble those of the differential RTK method, with an average error of only 2.7 cm and a standard deviation of 3.9 cm. This yaw angle correction method provides robust support for autonomous operations in agricultural machinery and vehicle environments. It is adaptable to different environmental conditions, thereby enhancing the performance and measurement accuracy of navigation systems.

Keywords: yaw angle correction; straight-line detection; agricultural and forestry environment

0 引 言

在农业自动化中,精确的位置信息对于种植、施肥等任务至关重要。惯性测量单元(inertial measurement unit, IMU)作为导航和定位的关键传感器之一,发挥着重要作用。

IMU 时间漂移和振动随机误差等问题威胁着测量准确性。尽管在横滚角和俯仰角估计方面,借助加速度计可以获得相对精确的结果,但在航向角估计中,缺乏绝对参考

进行校正^[1-3]。因此,开发有效的方法抑制航向角误差,从而提高导航系统的整体性能是当前研究重点。

为应对此问题,研究人员探索多种方法,如零速更新算法^[4-5],但如何有效地检测 IMU 是否处于静止状态,限制了方法的精确性。有学者^[6]通过动态地调整阈值,以确保陀螺仪在静止状态下不会产生漂移误差。尽管零速更新算法在某些情况下表现出色,但它通常更适用于行人导航,不适用于农林等环境下的持续行进的车辆导航。

在 IMU 航向角校正的研究中,有学者引入了其他传感

器来进行校正。如, Xia 等^[7]和 Xiong 等^[8]针对行驶中的车辆,采用车辆动力学模型进行速度估计,以减小航向角误差。然而,这种方法对车辆速度的精确性要求较高。另一方面,也有学者^[9-11]通过卫星导航系统对 IMU 进行实时修正。但这些方法测量精度易受到农林环境地形或树木遮挡的影响,在卫星失锁的情况下,位置和速度的测量误差会随时间累积。另一种常见的方法是将单眼相机、IMU 和单频多全球导航卫星系统(global navigation satellite system, GNSS)接收器进行紧耦合扩展卡尔曼滤波融合,以获得高精度位置信息^[12]。此外,一些研究者使用磁力计对航向角进行校正^[13-15]。磁力计易受到周围磁性材料的干扰,限制了其在农林环境中的适用性。另有一些研究^[16-17]利用实时动态(real-time kinematic, RTK)载波相位差分数据或借助启发式漂移消除法判断行人是否沿直线行进。尽管这些方法已用于 IMU 的校正,但它们在农林环境中的适用性受到了限制。

本文提出一种基于直线检测模型的航向校正方法,利用多传感器的数据,构建条件滤波和卡尔曼滤波的航向校正模型。根据采集的传感器状态进行直线检测阈值的更新,实现状态的动态调整。通过多传感器信息融合,提高导航系统的鲁棒性和精确性。

1 基于直线检测的航向角校正方法

航向角校正方法包括直线检测与航向角融合两部分。在直线检测部分,通过多传感器数据的协同应用,以监测车辆当前的行进状态。具体而言,当车辆被识别为处于直线行进状态时,采用卡尔曼滤波方法对车辆的姿态、速度等进行估计和校正。若车辆处于非直线行进状态,仅依赖 IMU 数据解算当前车辆的姿态信息。

1.1 运动学方程与数学模型

采用地理坐标系作为全局坐标系,以东北天方向为基准。小车上安装了多个传感器,包括 IMU、超宽带(ultra wide band, UWB)、轮速计等。各传感器的安装位置如图 1 所示。鉴于 IMU 传感器能够提供相对精确的横滚角和俯仰角估计,因此本研究将航向角校正限制在水平方向的二维校正。

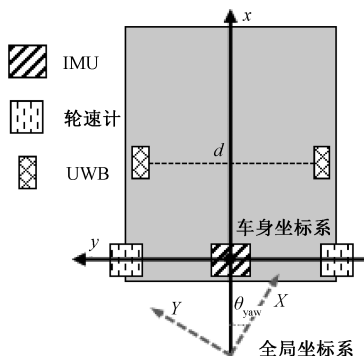


图1 车体模型图

在车辆同一水平面上,安装两个距离为 d 的 UWB 模块,这些模块旨在测量小车与基站之间的距离,并应用三点定位原理以确定车辆的精确位置。由于 UWB 数据呈线性关系,且噪声符合高斯分布,使用卡尔曼滤波对 UWB 数据进行预处理,降低 UWB 噪声对定位精度的影响。最终得到左 UWB、右 UWB 的坐标信息,包括坐标 $(x_{\text{uwb}}^l, y_{\text{uwb}}^l)$ 、 $(x_{\text{uwb}}^r, y_{\text{uwb}}^r)$ 以及相应时间戳 t 。

此外,两个后车轮安装角度编码器构成的轮速计,记录车轮转动角度,输出的 θ_{whe} 角度范围在 $-180^\circ \sim 180^\circ$ 之间,为确保数据的连续性和准确性,经过图 2 所示的预处理流程,以限制角度值在合理范围内,避免出现不连续的情况。同时,根据式(1)所示,以单侧车轮为例,考虑车轮转动的上一时刻角度 θ_{whe}^l 、当前时刻角度 $(\theta_{\text{whe}}^l, \theta_{\text{whe}}^r)$ 、数据接收频率 f 、车轮半径 r_{whe} 、车轮直径 d_{whe} 、上一时刻融合后的航向角 θ_{last} 以及时间戳 t_{whe} 等参数,并根据时间戳进行左右角度数据的匹配,从而获得车辆行进的位移 s_{whe} 、速度 v_{whe} 信息和航向角变化信息 $\Delta\theta_{\text{whe}}$ 。

$$\begin{cases} \theta_{\text{whe}} = \theta_{\text{whe}}^l - \frac{1}{f}(t_{\text{whe}}^l - t_{\text{whe}}^r)\Delta\theta_{\text{whe}}^l \\ s_{\text{whe}} = \frac{1}{2}(-\theta_{\text{whe}} \cdot r_{\text{whe}} \cdot \pi + \theta_{\text{last}} \cdot r_{\text{whe}} \cdot \pi) \\ v_{\text{whe}} = \frac{v_{\text{whe}}^l + v_{\text{whe}}^r}{2f} = \frac{\theta_{\text{last}} \cdot r_{\text{whe}} \cdot \pi - \theta_{\text{whe}} \cdot r_{\text{whe}} \cdot \pi}{2f} \\ \Delta\theta_{\text{whe}} = \frac{-\theta_{\text{whe}} \cdot r_{\text{whe}} \cdot \pi - \theta_{\text{last}} \cdot r_{\text{whe}} \cdot \pi}{d_{\text{whe}}} \end{cases} \quad (1)$$

IMU 传感器位于车辆后轮连线的中心,标志着车身坐标系的原点,在车身坐标系中, x 轴正方向与车辆前进方向一致, y 轴正方向位于车辆的左侧。IMU 传感器输出 θ_{imu} 和对应的时间 t_{imu} 。全局坐标系的 x 轴方向与车身坐标系的 x 轴方向之间的夹角表示为 θ_{yaw} ,用以表示车辆的航向角。

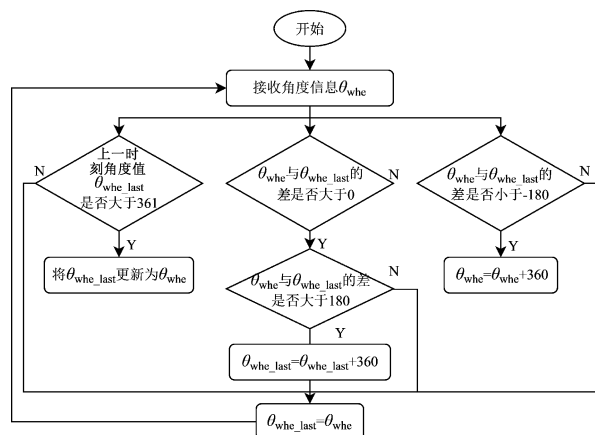


图2 轮速计数据预处理流程图

1.2 直线检测条件滤波

在获取 IMU、UWB 和轮速计的数据后,通过直线检测进行航向角的校正。以左侧 UWB 标签为例,通过最小二

乘法拟合直线如式(2)所示。

$$\begin{cases} S_{x,x} = \sum_{i=1}^n (x_{\text{uwb},i}^1 - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_{\text{uwb},i}^1)^2 \\ S_{x,y} = \sum_{i=1}^n (x_{\text{uwb},i}^1 - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_{\text{uwb},i}^1)(y_{\text{uwb},i}^1 - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_{\text{uwb},i}^1) \\ S_{y,y} = \sum_{i=1}^n (y_{\text{uwb},i}^1 - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_{\text{uwb},i}^1)^2 \\ S_{x,y} \text{ 接近于 } 0 \begin{cases} l_A = 1 \\ l_B = 0 \end{cases} \\ S_{x,y} \text{ 不接近于 } 0 \begin{cases} l_A = \frac{-S_{x,y}}{\sqrt{L_A^2 + L_B^2}} \\ l_B = \frac{\frac{1}{2}(S_{x,x} + S_{y,y} + \sqrt{(S_{x,x} - S_{y,y})^2 + 4 \cdot S_{x,y}^2}) - S_{x,y}}{\sqrt{L_A^2 + L_B^2}} \end{cases} \\ l_C = -(l_A \cdot \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_{\text{uwb},i}^1 + l_B \cdot \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_{\text{uwb},i}^1) \end{cases} \quad (2)$$

根据 UWB 标签接收到的 x, y 坐标, 计算均值和协方差, 得到左侧直线方程系数 (l_A, l_B) , 拟合出的直线方程为如式(3)所示。

$$l_A x + l_B y + l_C = 0 \quad (3)$$

拟合直线的决定系数 R^2 用来衡量拟合直线对于观测数据的拟合程度, R^2 的取值范围在 $0 \sim 1$ 之间, 表示模型能够解释的因变量的方差比例。通过检查 l_B 是否为 0 判断拟合直线是否垂直于 x 轴, 根据式(4)计算累加总平方和(SST)和累加误差平方和(SSE)。通过式(5)计算左侧拟合直线的 R^2 。

$$\begin{cases} \text{拟合直线不垂直于 } x \text{ 轴} \begin{cases} SST = SST + (y_{\text{uwb},i}^1 - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_{\text{uwb},i}^1)^2 \\ SSE = SSE + (y_{\text{uwb},i}^1 - (-x_{\text{uwb},i}^1 \cdot \frac{l_A}{l_B} - \frac{l_C}{l_B}))^2 \end{cases} \\ \text{拟合直线垂直于 } x \text{ 轴} \begin{cases} SST = SST + (x_{\text{uwb},i}^1 - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_{\text{uwb},i}^1)^2 \\ SSE = SSE + (x_{\text{uwb},i}^1 + \frac{l_C}{l_B})^2 \end{cases} \end{cases} \quad (4)$$

$$R^2 = 1 - \frac{SSE}{SST} \quad (5)$$

在获得 R^2 后, 通过 UWB 数据中左侧第一个数据点的数据 $(x_{\text{uwb}}^{\text{front}}, y_{\text{uwb}}^{\text{front}})$ 和最后一个数据点的数据 $(x_{\text{uwb}}^{\text{last}}, y_{\text{uwb}}^{\text{front}})$, 由式(6)计算左侧拟合直线航向角偏差 θ_{uwb}^l 。

$$\begin{cases} \text{当拟合直线不垂直于 } x \text{ 轴时:} \\ \begin{cases} \frac{l_A}{l_B} > 1 \text{ 或 } \frac{l_A}{l_B} < -1 \text{ 时, } \theta_{\text{uwb}}^l = \arctan \frac{y_{\text{uwb}}^{\text{back}} - y_{\text{uwb}}^{\text{front}}}{(-x_{\text{uwb}}^{\text{back}} + x_{\text{uwb}}^{\text{front}}) \cdot (\frac{l_B}{l_A} - \frac{l_C}{l_A})} \\ -1 \leq \frac{l_A}{l_B} \leq 1 \text{ 时, } \theta_{\text{uwb}}^l = \arctan \frac{x_{\text{uwb}}^{\text{back}} - x_{\text{uwb}}^{\text{front}}}{(-x_{\text{uwb}}^{\text{back}} + x_{\text{uwb}}^{\text{front}}) \cdot (\frac{l_A}{l_B} - \frac{l_C}{l_B})} \end{cases} \\ \text{当拟合直线垂直于 } x \text{ 轴时, } \theta_{\text{yaw}}^l = 90 \end{cases} \quad (6)$$

使用相同的方法求解出右侧拟合直线的 R_r^2 和航向角偏差 θ_{uwb}^r 。根据式(7)中左侧和右侧直线的 R^2 是否满足最小要求 R_{\min}^2 决定 UWB 角度值。根据 R_{\min}^2 根据不同环境、不同距离设定不同的值。

$$\begin{cases} \text{当 } R_{\frac{1}{2}}^1 > R_{\frac{1}{2}}^r \text{ 时,} & \theta_{\text{uwb}} = \theta_{\text{uwb}}^l \\ \text{当 } R_{\frac{1}{2}}^1 > R_{\frac{1}{2}, \min}^1 \text{ 且 } R_{\frac{1}{2}}^r > R_{\frac{1}{2}, \min}^r \text{ 时,} & \theta_{\text{uwb}} = \frac{\theta_{\text{uwb}}^r \cdot R_{\frac{1}{2}}^r + \theta_{\text{uwb}}^l \cdot R_{\frac{1}{2}}^l}{R_{\frac{1}{2}}^r + R_{\frac{1}{2}}^l} \\ \text{当 } R_{\frac{1}{2}}^r > R_{\frac{1}{2}}^l \text{ 时,} & \theta_{\text{uwb}} = \theta_{\text{uwb}}^r \end{cases} \quad (7)$$

轮速计在节 1.2 中提供了行进信息, 包括 s_{whe} 和 v_{whe} 和 θ_{whe} 。需要对左右两侧的轮速计进行直线检测判定, 以左侧轮速计为例, 判定流程如图 3 所示。判定流程包括航向角最小值 $\theta_{\text{whe}, \min}$ 、最大值 $\theta_{\text{whe}, \max}$ 、角度数据量 n_{whe} 、位移最小值 s_{\min} 、航向角积累最小值 $\theta_{\text{yaw}, \min}$ 、航向角积累最大值 $\theta_{\text{yaw}, \max}$ 以及上次判定为直线所经过的最小时间 $t_{\text{yaw}, \min}$ 等参数。这些参数根据不同环境、不同距离人为设定。

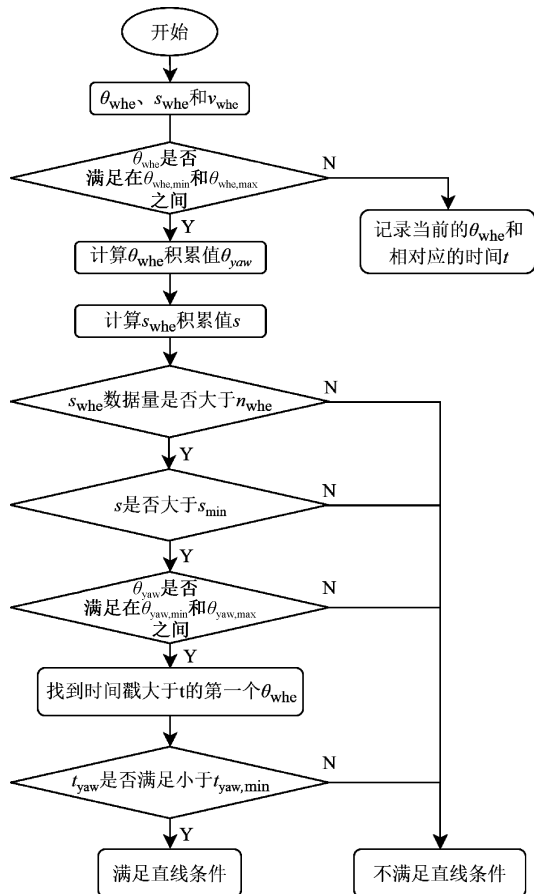


图 3 轮速计直线判定流程图

IMU 的直线检测判定流程如图 4 所示。其中, 航向角最小值 $\theta_{\text{imu}, \min}$ 、最大值 $\theta_{\text{imu}, \max}$ 和 θ_{imu}^l 等参数, 根据不同环境、不同距离人为设定。

1.3 基于卡尔曼滤波的航向角融合

本研究采用多传感器融合方法, 将双 UWB 和轮速计

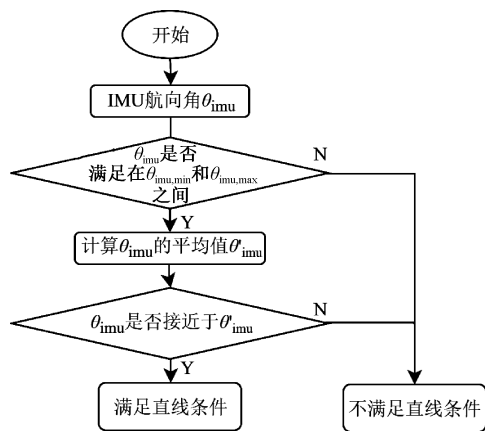


图 4 IMU 直线判定流程图

数据进行整合。融合算法的包括先验估计和后验估计两部分。在先验估计中,使用 IMU 的航向角 θ_{imu} 作为卡尔曼滤波的输入量 x , 偏航角误差 θ_{imu_err} 作为控制参数 u , 以及将两次接收数据时间差 t' 作为控制输入矩阵 b 。在后验估计中,利用观测得到的 UWB 和轮速计数据进行实时的状态更新和校正。这个过程不断迭代,最终输出融合后的 θ_{yaw} 值。先验估计模型与后验估计模型如式(8)所示。

$$\begin{cases} x = \theta_{imu} \\ u = \theta_{imu_err} \\ \begin{cases} \hat{x}_k^- = A\hat{x}_{k-1}^- + Bu \\ P_k^- = AP_{k-1}^-A^T + Q \\ K_k = P_k^-H^T(HP_k^-H^T + R)^{-1} \\ \hat{x}_k = \hat{x}_k^- + K_k(z_k - H\hat{x}_k^-) \\ P_k = (I - K_kH)P_k^- \end{cases} \\ z_k = \begin{cases} z_{uwb} = \theta_{uwb} \\ z_{whe} = \theta_{whe} \end{cases} \end{cases} \quad (8)$$

2 试验和分析

2.1 试验条件与环境

为评估本研究提出的随机误差校正方法,使用一辆配备了多种传感器的试验小车,包括六轴 IMU、绝对值式角度编码器制成的轮速计(数据范围 $-180 \sim 180$)、2 个 UWB 定位标签、5 个 UWB 定位基站以及差分 RTK 模块。在试验林场中预先布置 UWB 的基站,并将 UWB 标签安装在小车两侧,由于 UWB 超宽带信号在不同环境下数据传输速率不同,因此在试验开始前在试验环境中对 UWB 进行标定,以消除环境因素对试验结果的影响,试验环境选择长 100 m、宽 50 m 的区域,差分 RTK 模块作为试验的真值对照组,输出小车精确位置信息。

本研究在不同室外环境中进行试验,以验证在不同行进路径和行进速度下的有效性。在试验过程中,将小车沿着预定的路线以不同速度行驶,每个速度下进行 5 次试验。

采用多种方法与本研究方法进行比较。方法 1 为本研究提出的方法,方法 2 为差分 RTK,方法 3 为轮速计和 IMU 在没有经过校正融合的情况下的比较,方法 4 为 UWB 和 IMU 在没有经过校正融合的情况下的比较。试验所使用的设备和试验环境如图 5 所示。



图 5 试验设备与试验环境

2.2 直线行进试验

本试验选择一个航向角为 0° 方向的 100 m 直线进行开环试验。试验过程中,小车沿同一路线行进,通过本文提出的航向角校正方法,将轮速计、UWB 和 IMU 的航向角数据进行融合。试验分别以 0.15、0.30、0.40、0.60、0.80 m/s 的速度进行直线行进,各方法轨迹、航向角结果如图 6、7 所示。直线行进试验的数据总结在表 1 中。

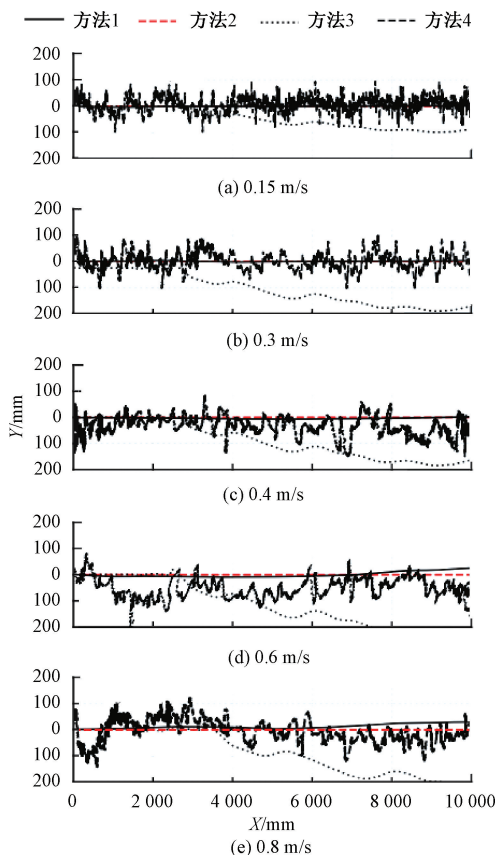


图 6 直线行进路径图

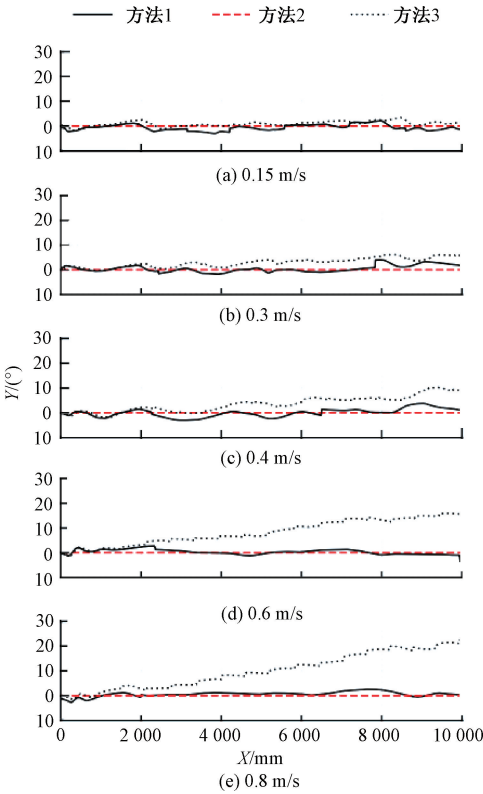


图 7 直线行进航向角图

表 1 直线行进试验数据

方法	速度	行程偏差/mm	航向角误差/(°)
1	0.15	17.28	0.68
	0.3	16.25	0.75
	0.4	26.47	1.21
	0.6	36.88	2.89
	0.8	48.69	4.56
3	0.15	124	3
	0.3	181	5
	0.4	189	10
	0.6	>200	20
	0.8	>200	>20
4	0.15		
	0.3		
	0.4	-100~100	—
	0.6		
	0.8		

根据图 6 的结果,随着速度的增加,方法 1 和方法 3 的偏差逐渐增大,当速度达到 0.8 m/s 时,行进 100 m 后,方法 1 偏差在 5 cm 以内,而方法 3 由于存在随机偏差,导致定位偏差超过 20 cm;当速度小于 0.6 m/s 时,方法 1 和方法 2 的偏差接近,但当速度大于 0.6 m/s 时,方法 1 受到 IMU 和轮速计随时间变化的偏移影响较大。而方法 2、4

的偏差受差分 RTK 和 UWB 不随时间和速度等因素的影响的特点,其偏差保持在 2 cm,但 UWB 的数据方差较大,因此定位精度相对较低。在速度一定时,方法 1 和方法 2 的效果优于方法 3 和方法 4,而随着距离的增加,方法 3 的偏差逐渐增大。

根据图 7 的结果,在速度一定时,方法 1 航向角误差保持在 5°以内,方法 3 误差明显高于方法 1 误差,方法 2 航向角误差不超过 0.30°,而方法 4 无法提供准确的航向角数值;随着速度和位移的增大,方法 3 误差也随之增大,在当速度为 0.8 m/s 时,行进 100 m 后,方法 3 航偏角误差超过 20°。在直线运动状态下,本研究方法与轮速计和 IMU 融合方法、UWB 和 IMU 融合方法相比,本方法将距离偏差小于 5 cm,航向角精度提高至 5°以内。

2.3 矩形行进试验

选择了一个矩形的行进路径,以进一步评估本文的航向角校正方法在不同情境下的性能。在试验过程中,小车以 0.40 m/s 的恒定速度沿着一个大小为 10 m×20 m 的矩形路径行进。

如图 8 所示,为方法 1、2、3、4 生成的矩形路径轨迹图像,图 9 为轨迹的局部细节,可以看出方法 1 与方法 2 的轨迹基本重合。方法 3 的轨迹随着行进时间的增加而逐渐发生偏移,轮速计在小车进行曲线运动时,会增加其偏差值,使其最大误差达到了 75 cm。方法 4 受到 UWB 数据影响

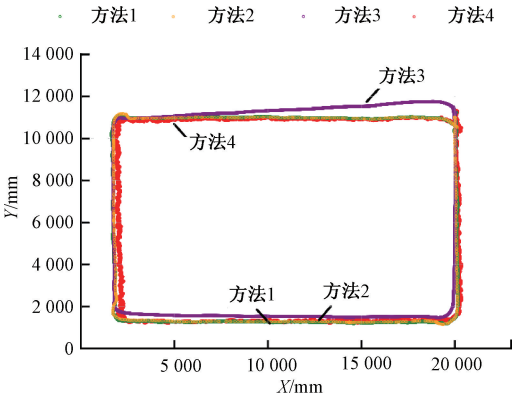


图 8 矩形路径图

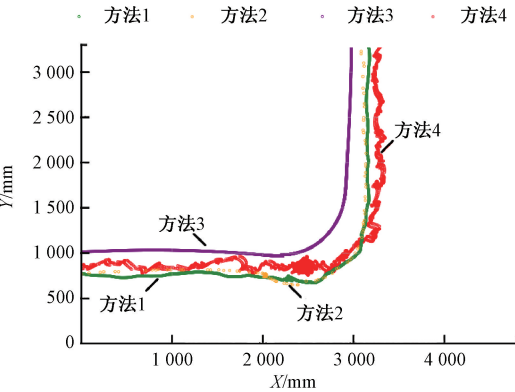


图 9 转弯处细节图

较大,但整体精度保持稳定,不随时间和距离的变化而变化。与方法3、4相比,方法1的位移曲线与方法2曲线更相近。将各方法的平均误差、标准差以及最大误差进行对比,对比结果如表2所示。

表2 不同方法误差对比

方法	平均误差	标准差	最大误差
1	2.7	3.9	8.0
2	—	—	—
3	25.7	39.8	75.0
4	5.3	7.3	25.0

3 结 论

本研究的目的是为了在农林环境中提高低成本传感器组成的定位平台精度,纠正航向角误差,通过采用IMU、UWB和轮速计等传感器,提出了一种多传感器数据融合的随机误差校正方法。

为了验证算法的有效性,针对不同的路径和不同的速度进行了室外实验。试验结果表明,本方法能够有效的提高车辆在环境中的定位精度。通过与其他方法进行对比分析,本方法提出的航向校正方法可以解决航向角受振动影响的随机误差问题。提高了导航系统的鲁棒性和精确性,使农业机械和车辆能够更好地适应多变的环境条件,为现代农业领域提供了有力的技术支持。

参考文献

- [1] ZHOU J M, ZHAO X M, CHENG X, et al. Vehicle ego-localization based on streetscape image database under blind area of global positioning system [J]. Shanghai Jiaotong Univ. (Sci.), 2019, 24: 122-129.
- [2] MUHAMMAD M N, SALCIC Z, WANG K. Indoor pedestrian tracking using consumer-grade inertial sensors with pztd heading correction[J]. IEEE Sensors Journal, 2018, 18(12): 5164-5172.
- [3] FEI Z H, JIA S C, LI Q. Low-cost and high-precision lane-level vehicle positioning method in an urban area based on traversal optimization for mimu calibration parameters [J]. Arabian Journal for Science and Engineering, 2022, 47: 9877-9886.
- [4] WANG J Y, XU X B, LIU J H. Pedestrian inertial navigation based on full-phase constraints of lower limb kinematics[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2022, 71: 1-9.
- [5] WANG J Y, LIU J H, XU X B, et al. A yaw correction method for pedestrian positioning using two low-cost MIMUs[J]. Measurement, 2023, 217: 112992.

- [6] MINH L H, ANTONIO P. Yaw/Heading optimization by drift elimination on MEMS gyroscope[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2021, 325: 112691.
- [7] XIA X, XIONG L, HUANG Y J, et al. Estimation on IMU yaw misalignment by fusing information of automotive onboard sensors[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2022, 162: 107993.
- [8] XIONG L, XIA X, LU Y S, et al. IMU-Based automated vehicle slip angle and attitude estimation aided by vehicle dynamics [J]. Sensors, 2019, 19(8): 1930.
- [9] ZHANG L, ZHU X H, HUANG J J, et al. BDS/IMU integrated auto-navigation system of orchard spraying robot[J]. Applied Sciences, 2022, 12(16): 8173.
- [10] HAN J H, CHI P, YOUNG Y J. Development of a moving baseline rtk/motion sensor-integrated positioning-based autonomous driving algorithm for a speed sprayer[J]. Sensors, 2022, 22(24): 9881.
- [11] 林子钧,尤德安,廖滔等. 基于GNSS+IMU的草方格固沙机自动巡航控制系统[J]. 农机化研究, 2024, 46(5): 37-44.
- [12] LI T, ZHANG H P, GAO Z Z, et al. Tight fusion of a monocular camera, MEMS-IMU, and single-frequency multi-GNSS RTK for precise navigation in GNSS-challenged environments[J]. Remote Sensing, 2019, 11(6): 610.
- [13] TONG X, SU Y, LI Z F, et al. A double-step unscented kalman filter and hmm-based zero-velocity update for pedestrian dead reckoning using MEMS sensors [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2020, 67(1): 581-591.
- [14] 赵红菊. 基于IMU的煤矿机器人定位算法研究[J]. 煤炭技术, 2022, 41(6): 192-195.
- [15] 路永乐,王汶新,冯涛,等. 基于磁力计在线校准的行人导航算法[J]. 电子测量技术, 2022, 45(5): 44-48.
- [16] 王付有,高成发,王剑超. 航向角约束的手机RTK航位推算融合定位模型[J]. 测绘科学, 2022, 47(7): 143-148.
- [17] 郭英,刘寒烁,叶瑾,等. 基于AHDE和手机陀螺仪的行人航向修正方法[J]. 中国惯性技术学报, 2021, 29(1): 8-15.

作者简介

刘诚,副教授,硕士生导师,主要从事农机自动导航定位等研究。

E-mail: liuch@nefu.edu.cn

花军(通信作者),教授,博士生导师,主要从事农机自动导航定位等研究。

E-mail: huajun81@163.com