

魏建胜,田光兆,刘宇峰. 基于插补-灰色理论的智能化农业车辆定位预测系统设计[J]. 江苏农业科学,2019,47(3):203-207.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2019.03.049

基于插补-灰色理论的智能化农业车辆定位预测系统设计

魏建胜, 田光兆, 刘宇峰

(南京农业大学工学院,江苏南京 210031)

摘要:为提高智能农业车辆自主导航中定位预测数据的精度,提出基于插补-灰色理论的定位预测方法。该方法利用 INS 模块在 RTK-GPS 的前后定位数据中插补进一定数量的定位预测数据点,提高定位数据的输出频率;同时将插补方法同灰色理论相结合,减少传统灰色理论在车辆定位预测时的误差。结果表明,本系统能够使定位数据的最大输出频率提高到 20 Hz;当车辆在一般路线上行驶时,插补-灰色理论的定位预测数据在正东方向上误差均值和误差均方差分别为 0.007 1 m、0.108 2,在正北方向上误差均值和误差均方差分别为 0.031 8 m、0.108 1;当车辆在特殊路线上行驶时,插补-灰色理论的定位预测数据在正东方向上误差均值和误差均方差分别为 0.045 2 m、0.450 3,在正北方向上误差均值和误差均方差分别为 0.003 4 m、0.323 0。通过插补-灰色理论的定位预测方法,能够实现对智能化农业车辆自主导航中未来时刻运动轨迹的预测。

关键词:农业车辆;导航;定位;插补-灰色理论;预测

中图分类号: S229 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2019)03-0203-05

智能化农业车辆的自主导航在自动喷洒农药、收割、中耕除草、插秧和耕作等许多方面有着广泛的应用。在农业车辆导航关键技术中,GPS、机器视觉、惯性导航单元和激光雷达等技术方向是国内外研究的重点。机器视觉能够提供车辆前进方向上的环境动态信息,进行直线跟踪导航,但农业环境和视觉数据复杂,它在导航避障上的应用较为广泛^[1-4];惯性导航单元^[5-7]能够高频率地提供车辆行驶时三轴方向上的加速度和角度信息,常作为组合导航^[8-10]的一部分;激光雷达能够提供车辆行驶时周围物体至车辆的实时距离,输出信息频率高误差小,但它处理数据量大且价格过于昂贵^[11-13]。现阶段,农业生产中车辆的高精度实时定位是至关重要的,研究多采用 RTK-GPS,它的定位误差达到厘米级^[14-16]。但高频输出的 RTK-GPS 经济性较差,且单一的导航技术很难满足复杂的农业生产情况。本研究采用 RTK-GPS 获取农业车辆导航中的实时定位数据,其定位数据输出频率为 1 Hz,在车辆中高速行驶状态下不满足实际需求。针对这类情况,加入惯性导航单元 INS,设计出 1 种农业车辆的高精度实时定位系统。采用插值获得基于 GPS 和 INS 的高频次定位数据,及时地对 GPS 数据,减少 INS 数据的漂移误差^[17-20],并将插补技术^[21-23]同灰色理论^[24-27]相结合,提高车辆在未来时刻定位数据的预测精确度。

1 插补设计原理

插补方法中已知物体运动曲线上的某些数据,按照某种算法计算已知点之间的中间点的方法,也称为数据点的密化。在农业车辆行驶过程中,RTK-GPS 的定位数据反映出它的运动轨迹;但 RTK-GPS 数据点是每隔 1 s 输出 1 次离散数据,要想得到更逼近于车辆行驶轨迹的曲线,必须利用 INS 模块的数据按照特定算法计算出原始 RTK-GPS 数据之间的中间点。

插补算法设计中,记 (x_i, y_i) 为 RTK-GPS 第 i 时刻定位数据点, (x_i^j, y_i^j) 为车辆 i 时刻至 $i+1$ 时刻之间的插补定位数据点,其中 $j \in (0, \dots, n)$, n 为插补个数。则第 i 时刻车辆在平面坐标系中正东、正北方向上的速度为

$$V_{x_i} = \frac{\sqrt{(x_{i+1} - x_i)^2 + (y_{i+1} - y_i)^2}}{T} \sin \theta^i; \\ V_{y_i} = \frac{\sqrt{(x_{i+1} - x_i)^2 + (y_{i+1} - y_i)^2}}{T} \cos \theta^i. \quad (1)$$

式中: T 为 RTK-GPS 定位数据的接收时间间隔,s; θ^i 为 i 时刻车辆前进方向与正北方向的夹角。

由此可得,车辆第 i 时刻至 $i+1$ 时刻之间在平面坐标系中各插补定位数据点正东、正北方向的位移量为

$$S_{x_i} = V_{x_i}gt + \frac{1}{2}\alpha_x gt^2; \\ S_{y_i} = V_{y_i}gt + \frac{1}{2}\alpha_y gt^2. \quad (2)$$

式中: α_x 、 α_y 分别为车辆在正东、正北方向上的瞬时加速度, m/s^2 ; t 为 a 的变化周期,s。则车辆在平面坐标系中正东、正北方向上的插补定位数据为

$$x_i^j = x_i^{j-1} + S_{x_i^{j-1}}; y_i^j = y_i^{j-1} + S_{y_i^{j-1}}. \quad (3)$$

收稿日期:2018-09-05

基金项目:国家自然科学基金(编号:31401291);江苏省研究生科研与实践创新计划项目(编号:SJCX18_0253)。

作者简介:魏建胜(1993—),男,江苏南京人,硕士研究生,主要从事智能化车辆导航技术研究。E-mail:to_weijiansheng@163.com。

通信作者:田光兆,博士研究生,讲师,主要从事智能化农业车辆无人自主导航关键技术研究。E-mail:tgz@njau.edu.cn。

式中: $j \in (0, n)$; $x_i^n = x_{i+1}^0$; $y_i^n = x_{i+1}^0$ 。

2 农业车辆定位系统设计

2.1 系统设计思想

在农业车辆上使用 RTK-GPS 来获取车辆行驶过程中的高精度定位数据,是智能化农业生产必不可少的环节。一般情况下,RTK-GPS 的定位数据输出频率为 1 Hz,当车辆以一定速度行驶时,前后 2 个定位数据点之间的距离就是定位盲区。而 INS 模块能够提供高频率的车辆运动状态信息,如三轴加速度、角度等;利用插补方法同 GPS 数据融合,能够在前后 2 个 GPS 定位数据之间插入已设定数量的 INS 定位数据,共同构成连续的高频率高精度定位数据组。

在车辆速度达到一定时,从时域的角度来看,1 Hz 定位数据输出是欠拟合的。在此基础之上,将插补后的数据组进

行灰色预测。因为数据之间的时间间隔变小,从而导致变量的变化程度也随之减小,定位数据的曲线拟合度会更好,对于车辆行驶状态细节的预测也会更精确。

2.2 硬件设计

本研究选用 South S82 型号的 RTK-GPS 采集农业车辆的高精度定位数据,选用 JY901 型蓝牙版姿态角度传感器采集车辆行驶的航向角和加速度,选用研华 UNO 3084 型工控机处理相关数据,工作频率为 1.6 GHz,4 GB 内存。RTK-GPS 通过 RS232 总线与工控机进行串口通信,INS 通过蓝牙模块与工控机进行串口通信。

2.3 上位机软件设计

上位机程序采用 C++ 开发完成,为了保证程序高效稳定地运行,设计中采用了多线程处理技术^[28-29],其程序流程图和软件界面分别如图 1、图 2 所示。

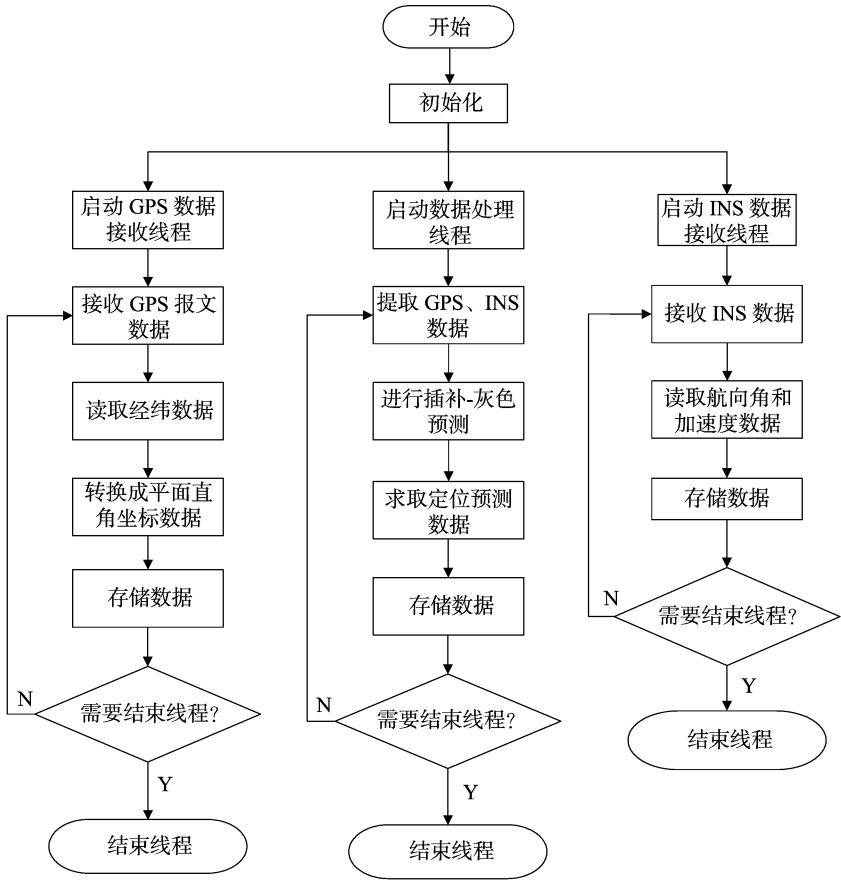


图1 上位机程序流程

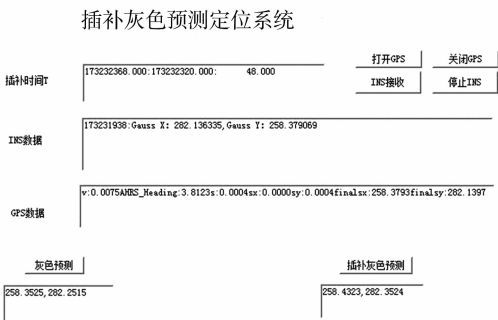


图2 上位机软件界面

3 插补-灰色预测

3.1 滑窗预测

GM(1,1)灰色预测模型具有建模数据需求量少、短期预测精度高等优点。采用基于滑窗特性的观测模型^[30],不再将观测的数据序列看作简单的随机过程,而是视为随时间变化的灰色过程,从而建立起灰色预测模型,并使其白化。由于 $\hat{s}(k+1)$ 不仅和 $s(k)$ 有关,还和窗口内其他 m 个观测值有关,这样,即使 $s(k)$ 的观测误差较大,但对 $\hat{s}(k+1)$ 的影响也会相对减弱,具体如图 3 所示。

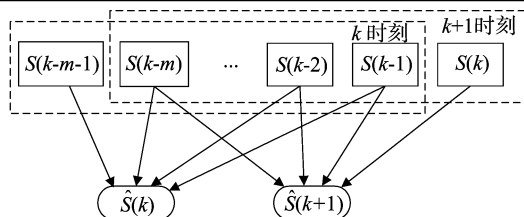


图3 滑窗预测模型

3.2 插补-灰色预测

传统灰色预测中,假设 k 时刻滑窗内有 $r(r=m+1)$ 个观测向量组样本 $X^{(0)}$,并将 $X^{(0)}$ 表示为

$$X^{(0)} = [x_1^{(0)}, x_2^{(0)}, \dots, x_r^{(0)}]。 \quad (4)$$

为降低干扰数据对有效数据的影响,对样本数据进行 1 次累加,得到的 1-AGO 序列 $X^{(1)}$ 为

$$X^{(1)} = [x_1^{(1)}, x_2^{(1)}, \dots, x_r^{(1)}]。 \quad (5)$$

式中: $X_r^{(1)} = \sum_{i=1}^n x_i^{(0)}, i=1, 2, \dots, r。$

因此 GM(1,1) 的表达式为一阶方程:

$$\frac{dx_i^{(1)}}{dt} + ax_i^{(1)} = b(i=1, 2, \dots, r)。 \quad (6)$$

在此基础之上,运用插补方法对观测向量组样本 $X^{(0)}$ 进行数据点密化,并调整滑窗容量,得到实时更新的插补样本 $\tilde{X}^{(0)}$:

$$\tilde{X}^{(0)} = [\tilde{x}_1^{(0)}, \dots, \tilde{x}_9^{(0)}, \tilde{x}_{10}^{(0)}, \dots, \tilde{x}_{19}^{(0)}, \dots, \tilde{x}_n^{(0)}]。 \quad (7)$$

若插补个数为 10,则公式(7)中

$$[\tilde{x}_1^{(0)} = x_1^{(0)}, \tilde{x}_{10}^{(0)} = x_2^{(0)}, \dots, \tilde{x}_{n_0}^{(0)} = x_r^{(0)}]。$$

同理得到 $\tilde{X}^{(0)}$ 的 1-AGO 序列 $\tilde{X}^{(1)}$ 为

$$\tilde{X}^{(1)} = [\tilde{x}_1^{(1)}, \tilde{x}_2^{(1)}, \dots, \tilde{x}_n^{(1)}]。 \quad (8)$$

其中,

$$\tilde{x}_i^{(1)} = \sum_{j=1}^n \tilde{x}_i^{(0)}, i=1, 2, \dots, r。$$

则插补后 GM(1,1) 的一阶方程表达式为

$$\frac{d\tilde{X}_i^{(1)}}{dt} + a\tilde{X}_i^{(1)} = b(i=1, 2, \dots, r)。 \quad (9)$$

按照最小二乘法求出 a 、 b 的估计值:

$$\begin{bmatrix} \hat{a} \\ \hat{b} \end{bmatrix} = (B^T B)^{-1} B^T X_n。$$

其中,

$$B = \begin{bmatrix} -\frac{1}{2}[\tilde{x}_1^{(1)} + \tilde{x}_2^{(1)}] & 1 \\ -\frac{1}{2}[\tilde{x}_2^{(1)} + \tilde{x}_3^{(1)}] & 1 \\ \vdots & \vdots \\ -\frac{1}{2}[\tilde{x}_{n-1}^{(1)} + \tilde{x}_n^{(1)}] & 1 \end{bmatrix}。$$

$$X_n = [\tilde{x}_1^{(0)} \quad \tilde{x}_2^{(0)} \quad \dots \quad \tilde{x}_n^{(0)}]^T$$

将 a 、 b 的估计值代入公式(9)即可得到 GM(1,1) 的白化方程,白化方程的解即为时间响应函数。离散化后,可得出预测模型:

$$\begin{cases} \tilde{x}_{n+1}^{(1)} = (\tilde{x}_1^{(0)} - \frac{\hat{b}}{\hat{a}})e^{-\hat{a}n} + \frac{\hat{b}}{\hat{a}} \\ \tilde{x}_{n+1}^{(0)} = \tilde{x}_{n+1}^{(1)} - \tilde{x}_n^{(1)} = (\tilde{x}_1^{(0)} - \frac{\hat{b}}{\hat{a}})[e^{-\hat{a}n} - e^{-\hat{a}(n-1)}] \end{cases}。 \quad (10)$$

通过此预测模型,可以预测出 $\tilde{X}_{n+1}^{(0)}$ 。

4 试验及分析

4.1 试验设计

本研究中,传统灰色预测和插补-灰色预测的滑窗容量根据经验值分别设置为 5、10,每次插补的个数为 5,时间间隔 $t=0.2$ s。为防止插补数据的偏移,将第 5 个插补数据用 GPS 定位数据代替,其插补-灰色预测模型如图 4 所示。

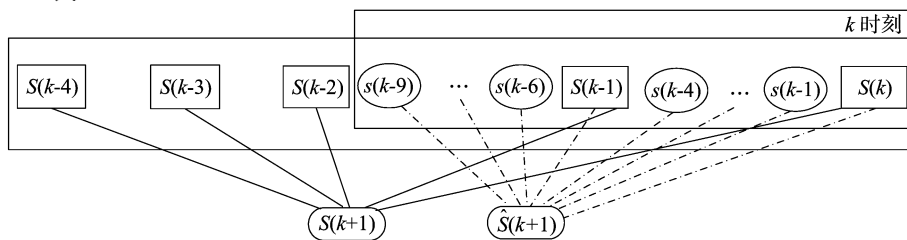


图4 插补-灰色预测模型

4.2 一般路线行驶试验

试验场地为南京农业大学工学院内的停车场,选用东方红 SG-250 型拖拉机进行试验。试验过程如下:首先由人工驾驶拖拉机按任意方向行驶,利用车载 RTK-GPS 和 INS 获取拖拉机在行驶路径上的高频次定位数据。然后打开上位机的灰色预测线程,获取拖拉机在未来时刻(算法设计为 1 s 后)的预测定位数据 A,显示并保存;再打开插补-灰色预测线程,获取拖拉机在未来时刻(算法设计为 1 s 后)的预测定位数据 B,显示并保存。最后将数据 A、B 和相同时刻的 RTK-GPS 定位数据进行比较,验证 2 种方法的预测精度。

一般路线行驶时,拖拉机先沿正西偏北 25° 方向直线加

速行驶,平均车速为 0.78 m/s;然后往北缓转弯,转弯半径为 3 m,平均车速为 0.92 m/s;最后朝正北偏西 15° 方向匀速直线行驶 32 m,平均车速为 1.16 m/s。试验结果如图 5 所示,在匀速直线路段,灰色预测和插补-灰色预测的定位数据均能与 GPS 定位数据较好地拟合,正东、正北方向上误差均值和误差均方差均小于整段路线平均值;在缓转弯路段,相比于灰色预测定位数据,插补-灰色预测的定位数据与 GPS 定位数据拟合度更好,其正东、正北方向上误差均值和误差均方差也更小。

从图 5 中截取 ab 段显示 GPS 和 INS 的插补定位数据,如图 6 所示。图中各点为拖拉机行驶时的插补定位数据点,并

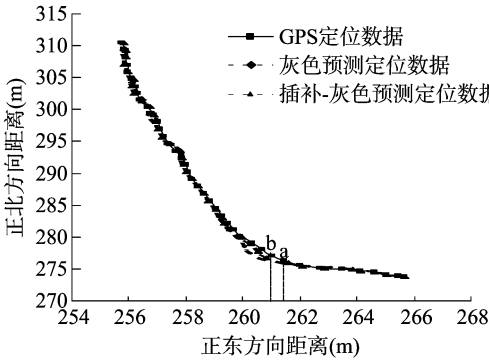


图5 一般路线行驶轨迹

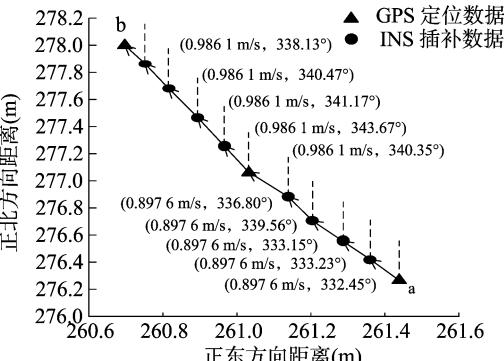


图6 ab 段 INS 插补数据

标注其在当前时刻的行驶速度和行驶方向。由于 INS 的漂移误差和插补算法的误差, GPS 定位数据同 INS 插补数据在交汇处不能完全拟合; 因此在进行插补 - 灰色预测时, 每隔 5 个定位点用 GPS 数据替代 1 次 INS 插补数据, 以减少拖拉机定位数据的累计误差。

4.3 特殊路线行驶试验

特殊路线行驶时, 拖拉机先沿正北偏西 40° 方向第 1 次急转弯, 转弯半径为 2 m, 平均车速为 0.82 m/s; 接着往正南偏东 45° 方向第 2 次急转弯, 转弯半径为 2.5 m, 平均车速为 0.85 m/s; 再沿着往正南偏西 60° 方向第 3 次急转弯, 转弯半径为 2.5 m, 平均车速为 0.88 m/s; 然后往正南偏东 50° 方向第 4 次急转弯, 转弯半径为 2 m, 平均车速为 0.79 m/s; 再沿正北偏东 40° 方向第 5 次急转弯, 转弯半径为 3 m, 平均车速为 0.88 m/s; 最后往正北偏西 40° 方向第 6 次急转弯, 转弯半径为 2 m, 平均车速为 0.77 m/s。试验结果如图 7 所示, 在农业车辆行驶方向不变时, 灰色预测和插补 - 灰色预测的定位数据与 GPS 定位数据能较好地拟合, 正东、正北方向上误差均值和误差均方差均小于整段路线平均值; 在急转弯、变速行驶等情况下, 相比于灰色预测定位数据, 插补灰色预测的定位

数据与 GPS 定位数据拟合度更好, 其正东、正北方向上误差均值和误差均方差也更小。由于试验路线的特殊性, 插补 - 灰色预测方法也存在一定的误差, 不能达到如一般路线行驶时的高拟合度。从图 7 中截取 cd 段显示 GPS 和 INS 的插补定位数据, 具体如图 8 所示。

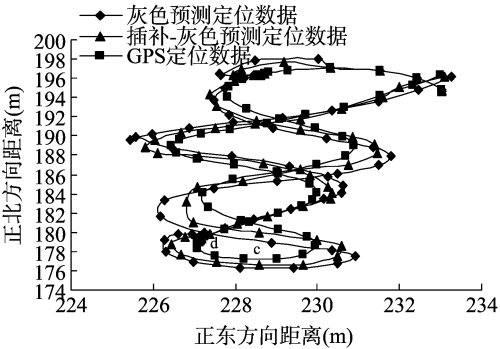


图7 特殊路线行驶轨迹

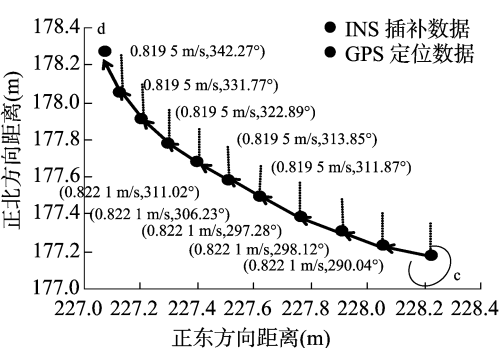


图8 cd 段 INS 插补数据

4.4 2 种预测方法比较

研究中, 对农业车辆在不同路线下行驶的 RTK - GPS、灰色预测和插补 - 灰色预测的定位数据进行整理, 分析灰色预测和插补 - 灰色预测的定位数据与 RTK - GPS 定位数据的误差情况, 包括正东和正北方向上的误差均值、误差均方差等, 结果如表 1 所示。由表 1 可知, 当车辆在一般路线上行驶, 插补 - 灰色预测模型的定位预测数据在正东方向上误差均值和误差均方差分别为 0.007 1 m、0.108 2, 在正北方向上误差均值和误差均方差分别为 0.031 8 m、0.108 1; 当车辆在特殊路线上行驶, 插补 - 灰色预测模型的定位预测数据在正东方向上误差均值和误差均方差分别为 0.045 2 m、0.450 3, 在正北方向上误差均值和误差均方差分别为 0.003 4 m、0.323 0。2 种预测方法的误差情况随行驶路线的不同而改变, 相比于一般路线, 特殊路线的正东方向误差均值和误差均方差均较大, 正北方向误差均值较小, 误差均方差较大; 同时, 在不同的路

表 1 2 种预测方法在不同路线下的误差分析

路线	项目	误差均值(m)		误差均方差	
		正东方向	正北方向	正东方向	正北方向
一般路线	灰色预测	0.036 3	0.075 1	0.185 8	0.156 2
	插补 - 灰色预测	0.007 1	0.031 8	0.108 2	0.108 1
	精度提升(%)	80.44	57.66	41.77	30.79
特殊路线	灰色预测	0.090 8	0.012 3	0.844 6	0.548 1
	插补 - 灰色预测	0.045 2	0.003 4	0.450 3	0.323 0
	精度提升(%)	50.22	72.36	46.68	41.07

线下,插补-灰色预测的误差均值和误差均方差均比传统的灰色预测小,其精度约提升 53%。

5 结论

研究中将 RTK-GPS 与 INS 模块相结合,按照特定算法进行插补使定位数据的输出频率提高到 20 Hz,满足农业生产活动所需的定位要求。农业车辆在进行特殊路线行驶时,传统灰色预测和插补-灰色预测的定位数据预测精度和误差稳定性均比车辆在进行一般路线行驶时要低。与传统的灰色理论相比,插补-灰色理论在预测智能化农业车辆导航中车辆下一时刻的定位数据时,利用多数数据点优势,能够获得更高的定位精度和稳定性。本试验采用人工驾驶拖拉机行驶,未来将进行全面自主导航下的定位预测研究,并结合视觉插补,以适应复杂环境下的农业生产活动。

参考文献:

- [1] Mok S H, Kim Y, Bang H. Vision - based terrain referenced navigation of aerial vehicles using an adaptive extended Kalman Filter [J]. Proceedings of The Institution of Mechanical Engineers Part G - Journal of Aerospace Engineering, 2018, 232(8): 1584 - 1597.
- [2] Lima D A, Victorino A C. A hybrid controller for vision - based navigation of autonomous vehicles in urban environments [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2016, 17(8): 2310 - 2323.
- [3] Zhang Q, Chen M E S, Li B. A visual navigation algorithm for paddy field weeding robot based on image understanding [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2017, 143: 66 - 78.
- [4] Bengochea - Guevara J M, Conesa - Munoz J, Andujar D, et al. Merge fuzzy visual servoing and GPS - based planning to obtain a proper navigation behavior for a small crop - inspection robot [J]. Sensors, 2016, 16(3): 276.
- [5] 张京, 陈度, 王书茂, 等. 农机 INS/GNSS 组合导航系统航向信息融合方法 [J]. 农业机械学报, 2015, 46(增刊 1): 1 - 7.
- [6] 刘军, 袁俊, 蔡骏宇, 等. 基于 GPS/INS 和线控转向的农业机械自动驾驶系统 [J]. 农业工程学报, 2016, 32(1): 46 - 53.
- [7] Han X, Kim H J, Jeon C W, et al. Development of a low - cost GPS/INS integrated system for tractor automatic navigation [J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2017, 10(2): 123 - 131.
- [8] Keun L H, Yu D L, Kwang H C, et al. A system for generating spatial information utilizing RTK - GPS/INS/Stereo camera for 3D map - based hybrid navigation [J]. Journal of Institute of Control, Robotics and Systems, 2018, 24(8): 757 - 766.
- [9] Chen Z M, Qu Y X, Zhang T S, et al. Hybrid adaptive particle swarm optimized particle filter for integrated navigation system [J]. Cmes - computer modeling in engineering & sciences, 2015, 106(6): 379 - 393.
- [10] Van T N, Duc T C, Tran D T. Application of street tracking algorithm in an INS/GPS integrated navigation system [J]. IETE Journal of Research, 2015, 61(3): 251 - 258.
- [11] Penizzotto F, Slawinski E, Mut V. Laser Radar based autonomous mobile robot guidance system for olive groves navigation [J]. IEEE Latin America Transactions, 2015, 13(5): 1303 - 1312.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] Cordesses L, Cariou C, Berducat M. Combine harvester control using real time kinematic GPS [J]. Precision Agriculture, 2000, 2(2): 147 - 161.
- [15] 谢德胜, 徐友春, 万剑, 等. 基于 RTK-GPS 的轮式移动机器人轨迹跟踪控制 [J]. 机器人, 2017, 39(2): 221 - 229.
- [16] Fukuba H, Adachi T, Yoshimoto A, et al. Measurement of vehicle attitude with RTK - GPS for analyzing the vehicle motion behavior [J]. JSAE Review, 2014, 34(3): 313 - 320.
- [17] Xu J M, Zhang H P, Sun J Z. Periodic error compensation for quartz MEMS gyroscope drift of INS [J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2007, 20(6): 539 - 545.
- [18] Kaviani S, Salarieh H, Alasty A, et al. Comparison of nonlinear filtering techniques for inertial sensors error identification in INS/GPS integration [J]. Scientia Iranica, 2018, 25(3): 1281 - 1295.
- [19] Cho S Y. Non - linear FIR smoothing filter for systems with a modelling error and its application to the DR/GPS integrated navigation [J]. IET Radar Sonar and Navigation, 2017, 12(8): 882 - 888.
- [20] Wang J, Han H Z, Meng X L, et al. Robust wavelet - based inertial sensor error mitigation for tightly coupled GPS/BDS/INS integration during signal outages [J]. Survey Review, 2017, 49(357): 419 - 427.
- [21] Liang Z W, Zhu S H, Fang F, et al. A twofold - interpolation - based path planning algorithm and its path following based on improved virtual vehicle method [J]. International Journal of Control, Automation and Systems, 2012, 10(1): 186 - 191.
- [22] 李增科, 高井祥, 王坚, 等. 利用牛顿差值的 GPS/INS 组合导航惯性动力学模型 [J]. 武汉大学学报 (信息科学版), 2014, 39(5): 591 - 595.
- [23] Wang X M, Cheng Y Y, Wu S Q, et al. An effective toolkit for the interpolation and gross error detection of GPS time series [J]. Survey Review, 2016, 48(348): 202 - 211.
- [24] 周俊, 张鹏. 基于灰色预测的农业机器人 GPS 导航系统硬故障隔 [J]. 农业机械学报, 2010, 41(12): 165 - 168, 177.
- [25] 刘思峰, 党耀国, 方志耕. 灰色系统理论及其应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2004.
- [26] 田光兆, 安秋, 姬长英, 等. 基于 Gray-EKF 算法的智能农业车辆同时定位与地图创建 [J]. 农业工程学报, 2012, 28(19): 17 - 25.
- [27] Chou T, Chu T W. An improvement in rollover detection of articulated vehicles using the grey system theory [J]. Vehicle System Dynamics, 2014, 52(5): 679 - 703.
- [28] Hukerikar S, Teranishi K, Diniz P C, et al. RedThreads: A interface for application - level fault detection/correction through adaptive redundant multithreading [J]. International Journal of Parallel Programming, 2018, 46(2): 225 - 251.
- [29] Berger E D, Yang T, Liu T P, et al. Grace: Safe Multithreaded Programming for C/C++ [J]. ACM SIGPLAN Notices, 2009, 44(10): 81 - 96.
- [30] 田光兆, 安秋, 姬长英, 等. 低速智能农业车辆多分辨率自适应测速系统设计 [J]. 农业机械学报, 2013, 44(2): 159 - 164.