

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2209820

GPS/BDS 和 IMU 融合技术在无人 配送车定位解算中应用研究*

张青春 周玲 吴峥

(淮阴工学院 淮安 223003)

摘要: 为了提高无人配送车定位精度,将 GPS/BDS 和惯性测量单元(IMU)多传感器融合技术用于无人配送车定位系统。为了解决 GPS/BDS 和 IMU 定位解算时产生的信号缺失和累计误差而导致的定位精度不高,抗干扰差等问题。本文采用 CKF 算法将 GPS/BDS 和(捷联惯导)SINS 解算出的定位结果进行滤波处理,从而提高定位精度。当 GPS/BDS 定位接收模块信号缺失时,将 IMU 提供的数据结合 SINS 算法解算出无人配送车的当前位置;在 IMU 定位过程出现的累计误差问题处理上,利用 CKF 处理过 GPS/BDS 接收机数据进行矫正。为了验证融合 GPS/BDS 和 IMU 的定位解算方法的优越性,实验中使用单个 BDS 定位系统进行定位结果比较。实验结果表明,使用本文所述方法速度误差减少了 27.89%,位置误差减少了 38.81%,能有效提高无人配送车在配送物品的过程中定位的精确度和稳定性。

关键词: GPS/BDS 双定位系统;定位解算;SINS;容积卡尔曼滤波

中图分类号: TP241.2;TB9 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.4

Application of GPS/BDS and IMU fusion technology in positioning solution of unmanned distribution vehicle

Zhang Qingchun Zhou Ling Wu Zheng

(Huaiyin Institute of Technology, Huai'an 223003, China)

Abstract: In order to improve the positioning accuracy of the unmanned distribution vehicle, the GPS/BDS and IMU multi-sensor fusion technology is applied to the positioning system of the unmanned distribution vehicle. To solve the problems of low positioning accuracy and poor anti-interference which caused by signal loss and cumulative error in GPS/BDS and IMU positioning solution. In this paper, CKF algorithm is used to filter the positioning results from GPS/BDS and sins. That it will improve the positioning accuracy. When the GPS/BDS positioning receiving module signal is missing, combine IMU which provides data set and SINS algorithm to get the current position of the unmanned distribution vehicle; In dealing with the cumulative error in IMU positioning process, CKF is used to correct the GPS/BDS receiver data. In order to verify the superiority of the positioning solution method integrating GPS/BDS and IMU, a single BDS positioning system is used in the experiment to compare the positioning results. The results show that the method used in this paper reduces the speed error by 27.89% and the position error by 38.81%, which can effectively improve the positioning accuracy and stability of the unmanned distribution vehicle in the process of delivering goods.

Keywords: GPS/BDS dual positioning system; positioning solution; strapdown inertial navigation system; cubature Kalman filter

0 引言

无人配送车是现今最热门的研究方向之一,它集聚了无人驾驶^[1]、定位解算^[2]、嵌入式系统开发等新一代电子信

息技术。无人配送车的研发,主要对于智慧交通^[3]、物流配送方面有了很大的创新,尤其是疫情爆发期间,无人配送车可以实现非接触式物资、物流配送,这不仅提高了物流公司的工作效率,也在很大程度上保障了人员的安全,为疫情防

收稿日期:2022-05-03

* 基金项目:江苏省研究生实践创新计划项目(SJCX21_1506)资助

控的需要提供了很大的便利。

在无人配送车的研发中,定位解算的精度和稳定性问题一直是研究的重难点。一般用于定位解算的传感器有GPS、BDS^[4]、UWB^[5]等。随着定位技术的不断优化,研究者们发现使用多个传感器融合定位^[6]的方法可以在很大程度上提高无人配送车定位的有效性和精确性。基于多传感器融合定位的主要内容是通过滤波算法将多个传感器所获得的位置信息进行融合从而得出最优位置信息。本文使用CKF滤波算法对GPS/BDS和IMU所解算出的定位信息进行融合滤波得出最终定位结果。目前,很多研究者都将多个传感器融合技术运用到无人驾驶、物流配送中。孙晓炜^[7]使用基于MEMS的IMU与GPS紧组合方式采用闭环卡尔曼滤波结构,使其在缺星的情况下也能保证定位的实时性。张国强等^[8]引入非采样特性的平稳小波变换对北斗/SINS组合定位系统进行噪声预处理,在一定程度上提高了定位系统的估计精度和解算结果的稳定性。杨菊花等^[9]采用滑模观测器(SMO)对GPS/INS进行滤波,通过实验证明该方法可有效抑制组合定位系统的误差发散和不确定性。

单个卫星系统与其他传感器组合定位在很大程度上提高了无人配送车的定位精度,但面对复杂环境下单个定位系统可能面临可探测星数过少定位信号不稳的情况,从而无法提供稳定精确的定位信息。樊静^[10]采用GSNN/INS与多模多频PPP技术紧组合算法提高了无人配送车在复杂场景下的抗差能力,进一步保证了无人车定位的可靠性。文献[11]采用IMM算法将GPS/BDS双定位系统与IMU融合通过提高算法模型的统计特性来进一步提高定位的精确度。胡朝阳等^[12]使用EKF算法与GPS/BDS双系统定位相结合,可有效地减少工作量,提高系统的可靠性和完好性。虽然使用多个定位系统与IMU相结合方法在很大程度上提高了定位的精度,但在非线性系统运算过程中存在精度不高、计算量过大以及出现累计误差等问题,张杰等^[13]将CKF算法运用到卫星导航定位的解算中,提高了定位系统的稳定性。

综上所述,本文提出使用CKF算法将BDS/GPS和IMU进行融合,建立合理的系统模型,得出最优定位估计值并设定阈值校正定位系统的位置、速度以及姿态信息。

1 算法总设计

本文所设计的无人配送车定位解算方法,采用的是结合CKF滤波算法将GPS/BDS和IMU进行融合定位其原理框图如图1所示^[14]。首先,利用SINS算法将IMU所提供的两种位置信息解算出当前无人配送车位置信息,通过已知卫星的位置求出SINS的伪距和伪距率。紧接着将BDS/GPS和SINS解算出的伪距测量值作为CKF滤波器的输入值带入所建模型中,最终得出最优估计值,为来防止累计误差和双定位系统信号缺失等情况出现,在最后设计

了阈值判断用来校正该定位解算系统的速度、位置以及姿态误差,从而使无人配送车的定位信息更加稳定可靠。

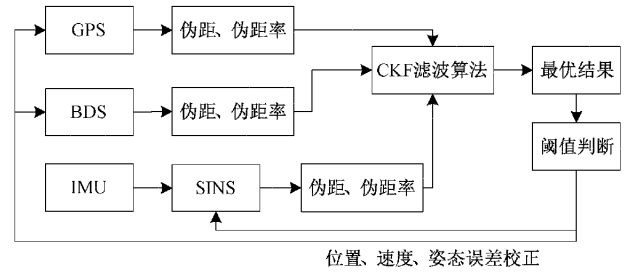


图1 无人配送车定位算法原理

2 定位解算分析

由上述总原理图可知,要想构建CKF算法的系统模型需要得到CKF的状态误差方程和伪距测量方程。所以需要分别求出GPS/BDS和通过SINS算法求解出的IMU的无人配送车位置结果。并将定位结果融合构建出CKF算法的伪距测量方程和状态误差方程。

2.1 GPS/BDS和SINS定位的测量方程

设GPS/BDS和SINS测量出来的位置坐标分别为 (x_{GB}, y_{GB}, z_{GB}) , (x_s, y_s, z_s) 则可以解算出与卫星之间的距离,并通过泰勒展开式,取前两项近似,得出最终的伪距方程。设GPS卫星 n 颗($n=1, 2, \dots, n$), BDS卫星 m 颗($m=1, 2, \dots, m$), $i=m+n>5$ 。GPS/BDS和输出的位置结果与第 i 颗卫星 (x_i, y_i, z_i) 的伪距方程如下^[15]:

$$\begin{cases} \rho_n = r_i^G + e_{i1}\delta x + e_{i2}\delta y + e_{i3}\delta z \\ \rho_m = r_i^B + e_{i1}\delta x + e_{i2}\delta y + e_{i3}\delta z \end{cases} \quad (1)$$

其中, r_i^B, r_i^G 为接收机与GPS和BDS卫星的几何距离公式,将3个方向上的一阶偏导数的系数简写为 e_{i1}, e_{i2}, e_{i3} 。

则GPS/BDS系统测量方程为:

$$Z_{GB}(t) = H_{GB}(t)X(t) + V_{GB}(t) \quad (2)$$

其中, $Z_{GB}(t) = [\dot{p}_1 \quad \dot{p}_2 \quad \dots \quad \dot{p}_n \quad \dots \quad \dot{p}_m]^T$,

$$H_{GB}(t) = \begin{bmatrix} e_{11} & e_{12} & e_{13} & 1 & 0 \\ e_{21} & e_{22} & e_{23} & 1 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ e_{n1} & e_{n2} & e_{n3} & 1 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ e_{m1} & e_{m2} & e_{m3} & 0 & 1 \end{bmatrix}, \text{测量噪声 } V_{GB}(t)。$$

同理,SINS求出的伪距通式和测量方程为:

$$\rho_{si} = r_i + e_{i1}\delta x + e_{i2}\delta y + e_{i3}\delta z \quad (3)$$

$$Z_s(t) = H_s(t)X_s(t) + V_s(t) \quad (4)$$

其中, $Z_s(t) = [\dot{p}_{s1} \quad \dot{p}_{s2} \quad \dots \quad \dot{p}_{si}]^T, X_s(t) = [\delta x \quad \delta y \quad \delta z \quad \delta t_u]^T$ 。

2.2 IMU定位解算分析

本文使用GPS/BDS与IMU相融合的方法求解无人

配送车的位置信息。这里将其采集到的三轴加速度和三轴角速度使用 SINS 算法解算出小车的瞬时速度、位置、以及位姿信息来辅助定位。

使用 SINS 算法,首先进行坐标变换,将当前的无人配送车坐标系转换成导航坐标系,其次将 IMU 中的加速度进行积分得到当前速度,将东北天三轴的速度转换为经度、纬度、高程的变化速度,在对其进行积分可得到无人配送车的地理位置。在姿态解算方面,先获取三轴加速度进行角速度补偿,其次进行姿态解算得到小车的航向角、俯仰角、横滚角。捷联惯导原理如图 2 所示。

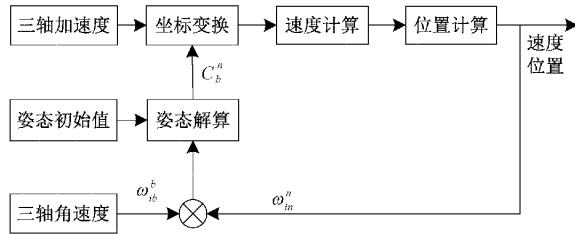


图 2 SINS 解算原理

2.3 GPS/BDS 和 SINS 状态误差方程

选取东、北、天(E、N、U)地理坐标系作为导航坐标系 n 系,无人配送车坐标系为 b 系,SINS 解算出来的数学平台记为 n' 系,记姿态角误差为 $\phi = [\phi_u \ \phi_e \ \phi_n]^T$;所测得的位置信息与实际位置坐标之间的速度误差为: $\delta v^n = [\delta v_u^n \ \delta v_n^n \ \delta v_h^n]^T$;位置误差为 $\delta P = [\delta l \ \delta \lambda \ \delta h]^T$; $b_g = [b_{gx} \ b_{gy} \ b_{gz}]^T$ 为三轴陀螺的常值误差; $b_a = [b_{ax} \ b_{ay} \ b_{az}]^T$ 三轴加速度的随机误差。 $w_g^b = [w_{gx} \ w_{gy} \ w_{gz}]^T$ 为 b 系下陀螺的噪声; $w_a^b = [w_{ax} \ w_{ay} \ w_{az}]^T$ 为 b 系下加速度计的噪声。则 SINS 状态量取为:

$$X_s(t) = [\phi \ \delta v^n \ \delta P \ b_g \ b_a \ w_g^b \ w_a^b]^T \quad (5)$$

非线性误差模型为:

$$\begin{cases} \dot{\phi} = C_w^{-1}[(I - C_n^n)\omega_{in}^n + \delta\omega_{in}^n - C_b^n b_g] + w_g^b \\ \delta \dot{v}^n = (I - C_n^n)C_b^n f^b - (2\omega_{ie}^n + \omega_{en}^n) \times \delta v^n + C_n^n C_b^n \nabla^b + w_a^b \\ \delta \dot{l} = \frac{\delta v_u^n}{R_N + h} \\ \delta \dot{\lambda} = \frac{v_e^n \sec l}{R_E + h} - \frac{v_{es} \sec l_s}{R_E + h} \end{cases} \quad (6)$$

其中, C_b^n 、 C_n^n 分别为 b 系与 n 系、 n 系与 n' 之间的姿态转换矩阵, C_w^{-1} 为欧拉角微分方程系数矩阵的逆矩阵; ∇^b 为 b 系下三轴加速度常值误差, f^b 为加速度计的实际输出; ω_{in}^n 、 ω_{ie}^n 、 ω_{en}^n 分别是解算出的旋转角速度、地球旋转角速度和数学平台相对于地球的旋转角速度; R_N 、 R_E 分别为当地子午圈、卯酉圈曲率半径。

通过上述误差模型转化得到 SINS 的状态误差方程:

$$X_s(t) = F_s(t)X_s(t) + G_s(t)W_s(t) \quad (7)$$

同样 GPS/BDS 双定位系统在运作时产生的误差 δt_{GPS} 、 δt_{BDS} 分别为 GPS 钟差、北斗钟差。则 GPS/BDS 定位解算的状态误差为:

$$X_{GB} = [\delta x_{GB} \ \delta y_{GB} \ \delta z_{GB} \ \delta t_{GPS} \ \delta t_{BDS}]^T \quad (8)$$

其状态误差方程可表示为:

$$X_{GB}(t) = F_{GB}(t)X_{GB}(t) + G_{GB}(t)W_{GB}(t) \quad (9)$$

其中, $F_{GB}(t) = I_{5 \times 5}$, $G_{GB}(t) = I_{5 \times 5}$, w_{Gb} 、 w_{Db} 为定位时产生的白噪声, $W_{GB}(t) = \begin{bmatrix} w_{Gb} \\ w_{Db} \end{bmatrix}$ 。

3 算法融合

3.1 GPS/BDS 与 IMU 融合定位机制

针对上述分析,可以得到适用于 CKF 算法模型架构的输入即, GPS/BDS 和 SINS 的伪距测量方程以及状态误差方程^[16]。将 GPS/BDS 和 SINS 解算出来的位置信息进行融合可以建立起有关 CKF 算法模型的 22 维状态向量方程和 5 维观测向量方程,通过 CKF 算法滤波运算求出最优无人配送车位置估计值,使它的定位结果越接近真实无人配送车的位置信息。在无人配送车行驶过程中会出现定位系统信号缺失和 IMU 产生的累计误差^[17]所导致的定位结果准确率逐渐下降等问题。所以本文采用阈值来判断来校正定位结果。当计算结果与真实位置之间所得的误差在阈值范围内则表示该系统模型架构稳定,这时可以将计算误差结果反馈给 SINS 和 GPS/BDS 修正其状态值,调整系统的状态误差模型。当所得的误差结果远大于所设阈值时表明 GPS/BDS 信号缺失,不能提供稳定的模型输入,则导致定位系统结构不稳定,解算不出最优的定位估算结果,则可以用系统中 SINS 解算出来的定位结果对 GPS/BDS 进行补偿辅助 GPS/BDS 导航定位。则由 CKF 算法融合 GPS/BDS 和 IMU 的过程如图 3 所示。

3.2 容积卡尔曼滤波算法

在处理 and 收集 GPS/BDS 和 IMU 的数据时,由于受到各种因素的影响,使定位计算结果与实际目标值相差很大,所以本文使用 CKF 算法建立系统运动的状态误差方程和观测方程可以解决计算量大,耗时长等问题,可以进一步解算出精度高的定位结果。

CKF 滤波对处理非线性系统很友好,适用于多维状态向量的运算^[18]。它采用的是三阶球面径向容积法则,使用容积点集计算出 CKF 算法的状态向量,误差协方差矩阵,卡尔曼增益等各个参量,即可得出 CKF 滤波中时间和测量更新周期的迭代过程,进一步得到下一时刻的最优状态估计值,其方程如下:

$$\begin{cases} \hat{x}_{k+1} = \hat{x}_{k+1|k} + K_{k+1}(z_{k+1} - \hat{z}_{k+1|k}) \\ K_{k+1} = P_{xx,k+1|k}(P_{zz,k+1|k})^{-1} \\ P_{k+1} = P_{k+1|k} - K_{k+1}P_{zz,k+1|k}K_{k+1}^T \end{cases} \quad (10)$$

其中, \hat{x}_{k+1} 、 K_{k+1} 、 P_{k+1} 、 z_{k+1} 分别为 $k+1$ 时刻的状态

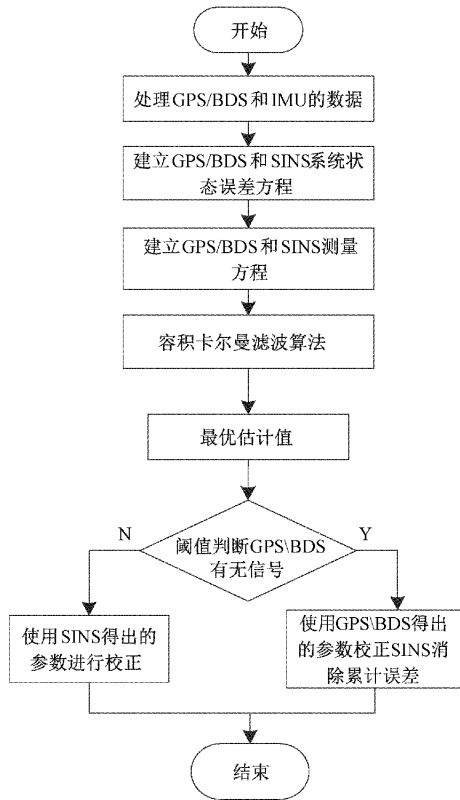


图3 融合定位算法流程

估计值、增益、状态误差协方差矩阵和测量值； $\mathbf{P}_{xx,k+1|k}$ 、 $\mathbf{P}_{k+1|k}$ 、 $\hat{\mathbf{x}}_{k+1|k}$ 、 $\hat{\mathbf{z}}_{k+1|k}$ 分别为 $k+1$ 时刻估计状态测量互协方差矩阵、估计状态协方差矩阵、状态预测值、测量预测值。

3.3 CKF 的状态误差方程和测量方程

关于 GPS/BDS 和 SINS 融合的状态误差方程可以将式(7)和(9)相结合就可以得到整体的 CKF 模型状态误差方程。

$$\mathbf{X}(t) = \mathbf{F}(t)\mathbf{X}(t) + \mathbf{G}(t)\mathbf{W}(t) \quad (11)$$

将 GPS/BDS 和 SINS 所得到的伪距测量式(2)和(4)相减得到 $Z_p = \hat{\rho}_{si} - \hat{\rho}_{GBi}$ ，则合并得到 CKF 整体得伪距测量方程为：

$$Z_p(t) = \mathbf{H}_p(t)\mathbf{X}(t) + \mathbf{V}_p(t) \quad (12)$$

3.4 定位阈值设计

CKF 滤波算法可以抑制随机误差对无人配送车的坐标解算的影响，但面对较大的非视距引起的误差，如接收机与卫星通讯时存在障碍物的干扰从而使得信号延迟或者消失。因此在得到最优值后加入阈值判别来鉴别无人配送车所处的环境。

取 $e = |z_{k+1} - x_{k+1|k}|$ ，其鉴别范围为：

$$\begin{cases} -TH \leq e \leq TH, & \text{GPS/BDS 有信号} \\ \text{其他,} & \text{GPS/BDS 无信号} \end{cases} \quad (13)$$

其中， z_{k-1} 为实际观测值， $x_{k+1|k}$ 为状态预测值，TH 为误差阈值。将 e 与所设阈值 TH 进行比较，当 e 在阈值范围内则表明系统架构稳定。配送车的 GPS/BDS 接收机可

以接收到卫星信号。则将 CKF 处理后的定位结果与实际值之间的误差 e 作为反馈对 GPS/BDS 和 SINS 的参数进行反馈校正，消减 IMU 的累计误差和修正 SINS 和 GPS/BDS 的位置、速度以及相应的姿态信息。如果 GPS/BDS 处于无信号时，则表明 e 远大于所设阈值此时需要使用 SINS 算法对获得的 IMU 数据进行位置坐标求解，最后使用 CKF 滤波获得的定位数据辅助无人配送车定位。

SINS 解算出来的位置信息 (l_s, λ_s, h_s) ，速度信息 (v_{es}, v_{ns}, v_{us}) ，姿态角 $(\phi_{es}, \phi_{ns}, \phi_{us})$ 其通过 CKF 算法矫正后的结果为：

$$\begin{cases} \dot{l}_s = l_s + \delta l \\ \dot{\lambda}_s = \lambda_s + \delta \lambda \\ \dot{h}_s = h_s + \delta h \end{cases}, \begin{cases} \dot{v}_{es} = v_{es} + \delta v_{e_s} \\ \dot{v}_{ns} = v_{ns} + \delta v_{n_s} \\ \dot{v}_{us} = v_{us} + \delta v_{u_s} \end{cases}, \begin{cases} \dot{\phi}_{es} = \phi_{es} + \phi_e \\ \dot{\phi}_{ns} = \phi_{ns} + \phi_n \\ \dot{\phi}_{us} = \phi_{us} + \phi_u \end{cases} \quad (14)$$

当 GPS/BDS 没有信号时，将 SINS 矫正过的位置信息对 GPS/BDS 的状态值进行修正，并辅助 GPS/BDS 双定位系统定位。其矫正后为：

$$\begin{cases} \dot{l}_{GB} = l_s + \delta l \\ \dot{\lambda}_{GB} = \lambda_s + \delta \lambda \\ \dot{h}_{GB} = h_s + \delta h \end{cases} \quad (15)$$

4 定位实验

本文的实验部分是在淮阴工院校园内完成。选用 RK3399 系列 ARM 微控制器；型号为 HFI-B 的 IMU 以及 FIT-GPS&BDS-UM220 型号的 GPS/BDS 双定位系统作为本实验的数据采集和处理定位结果的主要设备。将本文设计的无人配送车定位系统搭载在小车上在选定的路线上做匀速行驶运动，其搭载在小车上的无人配送车定位系统实物图和小车的行驶路线，如图 4、5 所示。



图4 无人配送车定位系统实物图

为了验证本文所解算出来的定位效果的优越性，将本文研究的 GPS/BDS 双系统与 IMU 融合后的定位结果与单个 BDS 定位系统进行比较分析。其中图 6、7 所展示的是小车在行驶过程中选取两组所测得 800 条定位信息与真实定位之间的位置误差和速度误差。在实验结果图中可以



图 5 行驶路线图

清晰的看出将 GPS/BDS 和 IMU 融合并使用 CKF 算法所测试出来的东、北、天 3 个方向的位置误差和速度误差整体上性能要优于单个 BDS 系统定位效果,其误差整体偏小,收敛性和稳定性更好。

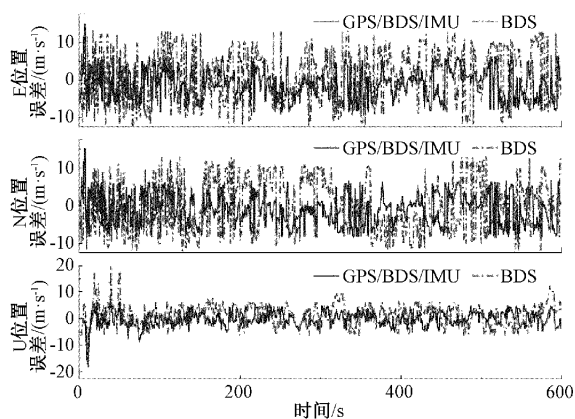


图 6 E、N、U 三个方向的位置误差

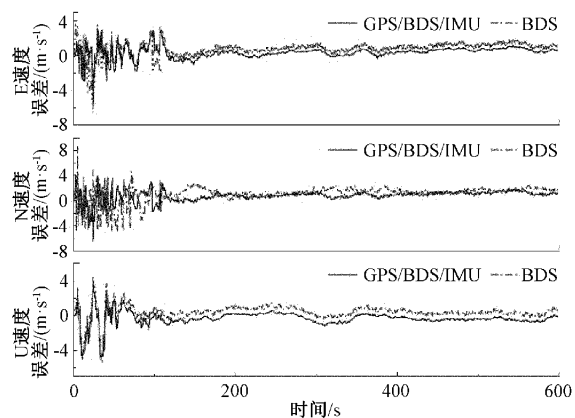


图 7 E、N、U 三个方向的速度误差

为了能更细致的看到本文所使用的 GPS/BDS 与 IMU 融合机制与使用单个 BDS 定位系统两者之间的差别,计算 2 种定位方法的统计值。表 1 显示了小车的 E、N、U 三个方向上位置误差(EPE)的标准差;表 2 显示了小车在行驶过程中 3 个方向的速度误差(VE)的标准差。由计算出的标准差可以看出,本文采用的融合机制所得出的三个方向

的位置误差的标准差为 4.26、4.35、2.54 m,要优于后者统计结果 7.13、7.15、3.98 m;速度误差的标准差为 0.65、0.82、0.53 m/s,要优于后者统计结果 0.87、1.19、0.72 m/s。

表 1 定位误差统计

EPE/m	标准差		
	E	N	U
BDS	7.13	7.15	3.98
GPS/BDS/IMU	4.26	4.35	2.54

表 2 速度误差统计

VE/(m·s ⁻¹)	标准差		
	E	N	U
BDS	0.87	1.19	0.72
GPS/BDS/IMU	0.65	0.82	0.53

5 结 论

本文主要研究一种 GPS/BDS 双定位系统与 IMU 融合的无人配送车定位解算方法,该方法设计的硬件系统具有可移植性,同样可以运用到机器人等相关领域。在 GPS/BDS 和 IMU 数据融合过程中使用 CKF 算法进行滤波减少定位解算误差,其主要原因 CKF 更适合高维度运算,收敛速度更快,更有助于 GPS/BDS 与 IMU 融合定位的解算。在实验过程中用单个 BDS 定位与 GPS/BDS 和 IMU 融合定位方法进行对比,通过实验结果分析发现 GPS/BDS 双系统与 IMU 融合机制的定位效果的可靠性更好,位置误差减少了 38.81%,速度误差减少了 27.89%,在很大程度上降低了定位误差,有效保障了物品配送时位置输出的实时性和精确度。

参 考 文 献

- [1] 孟庆元,邹守铭,孙娜,等. 全自动无人驾驶的系统服务可用性考核方法的研究[J]. 铁道车辆, 2022, 60(1): 79-81,85.
- [2] 段宇秀,杜文华. 影像测量仪自动定位方法研究[J]. 电子测量技术, 2019, 42(10): 95-98.
- [3] 刘帅,李秋伟,承林涛. 基于无人驾驶技术的无人配送物流服务体系研究[J]. 中国新通信, 2021, 23(1): 73-74.
- [4] 李树文,王潜心,武威. BDS-3 单双频信号全球定位精度分析[J]. 测绘科学, 2021, 46(12): 67-74.
- [5] 朱冰,陶晓文,赵健,等. 智能汽车两阶段 UWB 定位算法[J]. 交通运输工程学报, 2021, 21(2): 256-266.
- [6] 刘飞. 多传感器融合的高精度无缝定位模型与方法研究[J]. 测绘学报, 2021, 50(12): 1780.
- [7] 孙晓炜. 基于 MEMS 的 IMU/GPS 紧组合导航方法研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学, 2019.
- [8] 张国强,鲁昌华,李燕,等. 小波变换与改进 Kalman 在

- 北斗/SINS组合导航中的研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2019, 33(7): 65-71.
- [9] 杨菊花,李文元,陈光武,等. 引入滑模观测器的GPS/INS组合导航滤波方法[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(9): 78-86.
- [10] 樊静. GPS/BDS2/BDS3 PPP/INS/车载辅助紧组合算法研究与实现[D]. 武汉:武汉大学, 2021.
- [11] HAN H, WANG J, DU M Y. GPS/BDS/INS tightly coupled integration accuracy improvement using an improved adaptive interacting multiple model with classified measurement update[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2018, 31(3):556-566.
- [12] 胡朝阳,裴炳南,裴腾达,等. 一种改进EKF的双模导航系统的定位算法[J]. 信息技术, 2019, 43(4): 1-5.
- [13] 张杰,李婧华,胡超. 基于容积卡尔曼滤波的卫星导航定位解算方法[J]. 中国科学院大学学报, 2021, 38(4): 532-537.
- [14] 陈柯勋,邱伟. 一种基于改进卡尔曼滤波的GPS/BDS/SINS深组合定位算法[J]. 太原理工大学学报, 2020, 51(3): 5.
- [15] 王伟,丛宁,邬佳. 一种鲁棒GPS/INS组合导航滤波算法设计[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2021, 42(2): 240-245.
- [16] 陈亮,李超,师鹏宇. BDS/GPS组合导航定位研究[J]. 无线电工程, 2020, 50(3): 227-231.
- [17] 马星河,毕文龙,朱行,等. 改进SHAKF算法消除IMU随机误差的研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2021, 35(12): 59-67.
- [18] 郭士萃,王春雨,常丽敏,等. 鲁棒渐消CKF及其在SINS初始对准中的应用[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(4): 95-101.

作者简介

张青春,教授,主要研究方向为智能仪器、物联网和智慧交通等。

E-mail:1254668968@qq.com

周玲,研究生,主要研究方向为无人驾驶与定位导航。

E-mail:2539180625@qq.com

吴峥,研究生,主要研究方向为机器视觉与图像处理技术。

E-mail: 871699197@qq.com