

# 可融合里程计的INS/GNSS组合导航系统设计与试验分析



崔晓珍<sup>1</sup>,周琪<sup>2</sup>,武东杰<sup>1</sup>,仲训昱<sup>1</sup>

1.厦门大学,福建 厦门 361102

2.航空工业西安飞行自动控制研究所,陕西 西安 710065

**摘要:**为了解决卫星信号被遮挡环境下MEMS-INS/GNSS组合导航漂移问题,对GNSS信号中断时的MEMS-INS/GNSS系统应如何抑制导航误差的漂移进行了研究。采用基于误差状态的EKF信息融合方法,灵活接入轮式或视觉里程计(OD)的速度约束,建立了一种MEMS-INS/GNSS/OD导航系统。在试验中,对比分析了加入AHRS和里程计信息对导航定位精度的影响。试验结果表明,在GNSS间断环境下,融合里程计能够克服卫星信号中断的影响,在GNSS中断30s时,相较于MEMS-INS/GNSS导航系统,定位精度提高了89.70%,且加入AHRS方向约束,能够更好地抑制定位漂移。此外,接入视觉里程计的MEMS-INS/GNSS/OD系统比接入轮式里程计的系统精度提高了16.11%。

**关键词:**扩展卡尔曼滤波;卫星拒止环境;惯性导航系统;卫星定位系统;组合导航

中图分类号:V249

文献标识码:A

DOI: 10.19452/j.issn1007-5453.2022.02.013

近年来,随着小型无人机、无人车的快速发展和应用,为了降低成本,开发低成本的微机电式惯性导航系统(MEMS-INS)成为研究热点。但是MEMS惯性导航系统存在较大的测量噪声,并且经过积分会产生累计误差。因此,当MEMS惯性导航系统单独使用时,误差会随着时间的推移快速增大,可能在数十秒的时间内漂移几十到上百米。为了抑制MEMS-INS误差,常常需要结合其他外部观测量进行约束<sup>[1-3]</sup>。全球导航卫星系统(GNSS)可以在室外环境中提供全天候、全球参考定位,不存在累积漂移的问题。而且我国一直十分关注卫星导航系统的开发,卫星导航系统的定位精度有所保障<sup>[4]</sup>。因此,为了提高导航定位的性能,通常将GNSS与INS结合使用<sup>[5-9]</sup>,如INS/GPS、INS/BDS组合导航等。但是在高楼、峡谷、丛林区域等复杂环境下,GNSS卫星信号易被遮挡而出现短时中断,进而导致MEMS-INS/GNSS组合导航的精度受到严重影响。为了抑制GNSS信号中断时MEMS-INS的误差漂移,需要进一步在MEMS-INS/GNSS组合系统中融合其他位姿测量信息,如常用的视觉里程计或轮式里程计等<sup>[10-12]</sup>。

针对卫星定位信号中断问题,本文对可融合里程计(Odometer, OD)的MEMS-INS、GNSS组合导航系统进行设计和试验分析。主要内容包括:(1)建立基于误差状态扩展卡尔曼滤波的MEMS-INS/GNSS/OD融合定位方法,并加入姿态参考系统(AHRS)方向约束,解决姿态漂移和无绝对方向参考的问题;(2)MEMS-INS/GNSS/OD融合算法支持接入视觉里程计或接入轮式里程计,既可应用于地面无人车导航定位,又可用于实现无人机的视觉辅助INS/GNSS组合导航。

## 1 组合导航系统框架

加入AHRS姿态解算的方向约束的MEMS-INS/GNSS/OD组合导航系统如图1所示,其中EKF作为整个组合导航系统的融合算法,OD为里程计(轮式里程计或视觉里程计),GYRO、ACC分别为MEMS-IMU中的陀螺仪和加速度计,MAG为磁力计。

设载体坐标系标记为**b**,导航坐标系标记为**n**,旋转矩阵 $C_n^b \in \text{SO}(3)$ 代表数据从导航坐标系转换到载体坐标系, $w^b \in \mathbf{R}^3$ 是三轴陀螺仪测量值, $a^b \in \mathbf{R}^3$ 是三轴加速度测量

收稿日期:2021-07-15;退修日期:2021-09-19;录用日期:2021-11-18

基金项目:航空科学基金(201908068003)

引用格式: Cui Xiaozhen, Zhou Qi, Wu Dongjie, et al. Design and experimental analysis of INS/GNSS integrated navigation system with odometer[J]. Aeronautical Science & Technology, 2022, 33(02): 84-89. 崔晓珍,周琪,武东杰,等.可融合里程计的INS/GNSS组合导航系统设计与试验分析[J].航空科学技术,2022,33(02):84-89.

值,  $m^b \in \mathbf{R}^3$  是三轴磁力计测量值,  $q^b \in \mathbf{R}^4$  是AHRS输出的四元数,  $\hat{p} \in \mathbf{R}^3, \hat{v} \in \mathbf{R}^3$  分别代表融合后的位置和速度。

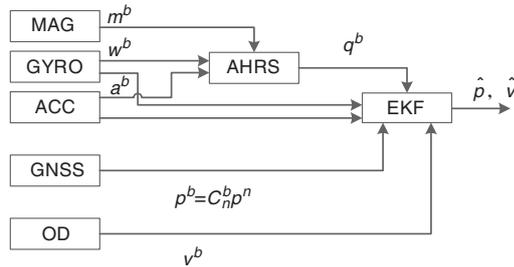


图1 加入AHRS方向约束的组合导航系统框架

Fig.1 Framework of integrated navigation system with direction constraint by adding AHRS

## 2 扩展卡尔曼滤波建模

卡尔曼滤波器(KF)及其变形算法已被广泛用于传感器融合。其通过一系列噪声测量来估计线性和非线性动态系统的状态。定位问题是非线性问题,可用处理非线性动力学或非线形测量模型的扩展卡尔曼滤波(EKF)来解决。

为减小非线性影响,且采集的数据是一系列的离散点,因此本文建立离散型扩展卡尔曼滤波模型。假设离散系统模型中的噪声具有正态分布特性,则离散时间系统下误差状态方程可定义为

$$\delta_x = f(x, \delta_x, u_m, i) = F_x(x, u_m)\delta_x + F_i i \quad (1)$$

式中:  $x = [p \ v \ q \ a_b \ w_b]^T$  是标称状态矢量;  $\delta_x = [\delta_p \ \delta_v \ \delta_\theta \ \delta_{ba} \ \delta_{bw}]^T$  是误差状态矢量; 输入矢量  $u_m = [a_m \ w_m]^T, a_m = [a_x \ a_y \ a_z]^T$  是三轴加速度测量值,  $w_m = [w_x \ w_y \ w_z]^T$  是三轴角速度测量值; 扰动脉冲矢量  $i = [v_i \ \theta_i \ a_i \ w_i]^T$ , 这里  $v_i, \theta_i, a_i$  和  $w_i$  分别是通过白高斯过程建模的三个方向上的速度、方向、加速度和角速度的偏置估计;  $F_x$  和  $F_i$  分别是  $f(\cdot)$  函数关于误差和扰动矢量的雅可比矩阵。本文EKF模型采用的变量见表1。其中,误差量即为真实量和名义量之间的差,  $x_i = x \oplus \delta_x$  ( $\oplus$  是估计值与误差的合成运算: 和/或四元数乘积); 误差量姿态四元数计算公式为  $\delta_q = \exp(\delta_\theta/2)$ 。

### 2.1 预测过程

首先,根据IMU数据信息建立预测方程,这里将初始时刻IMU的坐标系(ENU)设置为融合坐标系。当获得其他观测信息后,再进行系统更新。

预测过程负责向前预测当前状态和误差协方差估计,以获得下一步的先验估计。则EKF的预测方程为

表1 EKF模型中的变量介绍

Table 1 Introduction to variables in EKF model

物理量	真实量	名义量	误差量
全状态 $\in \mathbf{R}^{16}$	$x_i$	$x$	$\delta_x$
位置 $\in \mathbf{R}^3$	$p_i$	$p$	$\delta_p$
速度 $\in \mathbf{R}^3$	$v_i$	$v$	$\delta_v$
四元数 $\in \mathbf{R}^4$	$q_i$	$q$	$\delta_q$
比力测量偏差 $\in \mathbf{R}^3$	$a_{bi}$	$a_b$	$\delta_{ba}$
陀螺仪测量偏差 $\in \mathbf{R}^3$	$w_{bi}$	$w_b$	$\delta_{bw}$
角度矢量 $\in \mathbf{R}^3$	$\theta_i$	$\theta$	$\delta_\theta$
旋转矩阵 $\in \text{SO}(3)$	$R_i$	$R$	$\delta_R$

$$\hat{\delta}_x = F_x(x, u_m)\hat{\delta}_x \quad (2)$$

$$P = F_x P F_x^T + F_i Q_i F_i^T \quad (3)$$

式中:  $\hat{\delta}_x$  为误差状态的估计值,  $\delta_x \sim N(\hat{\delta}_x, P)$  满足高斯分布;  $Q_i$  为扰动脉冲的协方差矩阵;  $P$  为协方差矩阵。

### 2.2 观测过程

#### 2.2.1 位置观测方程

获得GNSS位置信息后需要将基于WGS84地理坐标系的经纬度信息转换到地球坐标系(ECEF),再从ECEF转换到当地东北天(ENU)坐标系,最后转换到IMU融合坐标系,才能进行状态信息的更新。基于GNSS的位置观测方程

$$y_{\text{GNSS}} = h_{\text{GNSS}}(x_i) + n_{\text{GNSS}}, \quad n_{\text{GNSS}} \sim N\{0, V_{\text{GNSS}}\} \quad (4)$$

式中: 测量值  $y_{\text{GNSS}}$  为GNSS的位置信息;  $h_{\text{GNSS}}(\cdot)$  表示GNSS系统的状态, 此处  $h_{\text{GNSS}}(x_i) = p$ ;  $n_{\text{GNSS}}$  是一个协方差为  $V_{\text{GNSS}}$  的白高斯噪声, 使用GNSS接收机获得的位置协方差进行计算。  $H_{\text{GNSS}}$  是  $h_{\text{GNSS}}(x_i)$  函数关于误差的雅可比矩阵

$$H_{\text{GNSS}} \triangleq \frac{\partial h_{\text{GNSS}}(x_i)}{\partial \delta_x} = \frac{\partial h_{\text{GNSS}}(p + \delta_p)}{\partial \delta_x} = [I \ 0 \ 0 \ 0 \ 0] \quad (5)$$

#### 2.2.2 速度观测方程

轮式里程计的速度是前进方向的速度,且是局部速度,所以针对局部速度,建立局部坐标系的速度测量模型,则加入轮式里程计(OD1)的速度观测量的测量方程可以写成

$$y_{\text{OD1}} = R_i^T v_i + n_{\text{OD1}}, \quad n_{\text{OD1}} \sim N\{0, V_{\text{OD1}}\} \quad (6)$$

式中:  $y_{\text{OD1}}$  为轮式里程计速度的测量值;  $n_{\text{OD1}}$  为一个协方差为  $V_{\text{OD1}}$  的白高斯噪声。  $H_{\text{OD1}}$  是  $R_i^T v_i$  关于误差的雅可比矩阵:

$$H_{\text{OD1}} \triangleq \frac{\partial R_i^T v_i}{\partial \delta_x} = \begin{bmatrix} 0 & R_i^T \frac{\partial (R_i^T v_i)}{\partial q_i} \frac{\partial (\delta_q \otimes q)}{\partial \delta_\theta} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (7)$$

视觉里程计的速度是全局速度,因此应建立全局坐标

系的速度观测模型,则加入视觉里程计(OD2)的速度观测量的测量方程可以写成

$$y_{OD2} = v_t + n_{OD2}, n_{OD2} \sim N\{0, V_{OD2}\} \quad (8)$$

式中: $y_{OD2}$ 为视觉里程计速度的测量值; $n_{OD2}$ 是一个协方差为 $V_{OD2}$ 的白高斯噪声。 $H_{OD2}$ 是 $h_{OD2}(x_t)$ 函数关于误差的雅可比矩阵

$$H_{OD2} \triangleq \frac{\partial h_{OD2}(x_t)}{\partial \delta_x} = \frac{\partial h_{OD2}(v + \delta_v)}{\partial \delta_x} = [0 \quad I \quad 0 \quad 0 \quad 0] \quad (9)$$

### 2.2.3 姿态观测方程

加入AHRS的姿态解算的测量方程可以表示为

$$y_{AHRS} = h_{AHRS}(x_t) + n_{AHRS}, n_{AHRS} \sim N\{0, V_{AHRS}\} \quad (10)$$

式中: $y_{AHRS}$ 为AHRS测得的姿态测量值; $h_{AHRS}(\cdot)$ 表示姿态系统的状态,此处 $h_{AHRS}(x_t) = q_t$ ;  $n_{AHRS}$ 是一个协方差为 $V_{AHRS}$ 的白高斯噪声。 $H_{AHRS}$ 是 $h_{AHRS}(x_t)$ 函数关于误差的雅可比矩阵

$$H_{AHRS} \triangleq \frac{\partial h_{AHRS}(x_t)}{\partial \delta_x} = \frac{\partial h_{AHRS}(\theta + \delta_\theta)}{\partial \delta_x} = [0 \quad 0 \quad I \quad 0 \quad 0] \quad (11)$$

### 2.3 更新过程

更新过程负责反馈,将新的度量合并到先验估计中,以获得改进的后验估计,设 $K$ 为卡尔曼增益,则更新方程为

$$K = PH^T(HPH^T + V)^{-1} \quad (12)$$

$$\hat{\delta}_x = K(y - h(\hat{x}_t)) \quad (13)$$

$$P = (I - KH)P(I - KH)^T + KVK^T \quad (14)$$

以上基于误差的模型只提供修正,不是实际的导航状态 $x_t$ ,所以每次更新之后都需要将EKF的状态量设置为0,即令 $\hat{\delta}_x = 0$ 。

## 3 试验结果

### 3.1 试验平台

在试验验证中,采用的试验平台是SCOUT四轮无人车,其配置的IMU、GPS、视觉和轮式里程计等传感器如图2所示。计算机为研华工控机ARK-3510L-00A1E,装配Ubuntu和ROS系统。

测试时使用北云科技研制的A1系列板卡,接收频率为5Hz的GNSS测量数据,此数据为单点定位数据,定位精度等级为米级;采用的MEMS惯性导航单元为Xsens MTi-30,用来获取400Hz的加速度和角速度数据。使用的轮式里程计为SCOUT无人车自带的编码器测速传感器;使用



图2 试验平台及传感器设置图

Fig.2 Test vehicle and sensor setting diagram

ZED双目相机设计视觉里程计。

为了试验分析,使用千寻位置提供的RTK数据并将其输入司南导航研制的接收机M600mini-G中,获得频率为10Hz的厘米级定位,用作测试的参考值。MEMS-INS/GNSS组合导航系统采用的器件参数见表2。

表2 传感器技术参数表

Table 2 Technical parameters of sensor

陀螺仪	零偏重复性/( $^{\circ}$ )/s	0.2
	零偏稳定性/( $^{\circ}$ )/h	18
	噪声密度/( $^{\circ}$ )/s/ $\sqrt{\text{Hz}}$	0.03
加速度计	采样率/Hz	400
	零偏重复性/mg	5
	零偏稳定性/ $\mu\text{g}$	15
	噪声密度/( $\mu\text{g}$ )/ $\sqrt{\text{Hz}}$	60
GNSS	采样率/Hz	400
	单点定位精度/m	$H \leq 1.5, V \leq 2.5$
	采样率/Hz	5

### 3.2 实地测试

以无人车在校园围绕建筑行驶一周采集的数据进行测试(起点和终点均在原点处)。测试1:中断GNSS信号30s,分析MEMS-INS/GNSS/OD系统中有无AHRS方向约束对融合定位精度的影响;测试2:中断GNSS信号60s,分析接入视觉里程计或轮式里程计,对有AHRS方向约束的MEMS-INS/GNSS组合导航系统定位精度的影响。

#### 3.2.1 测试1试验结果

在这个试验中,人为使GNSS信号中断30s,且接入的里程计为轮式里程计,中断路段为图中虚线椭圆标出的区域。图3和图4中绿色实线为参考定位轨迹,蓝色点为既未添加OD速度约束,又未添加AHRS方向约束时的定位轨迹,即MEMS-INS/GNSS系统的定位轨迹;红色实线表示的是未加入AHRS方向约束,只加入轮式里程计速度约束的定位轨迹,即MEMS-INS/GNSS/OD组合导航系统的定

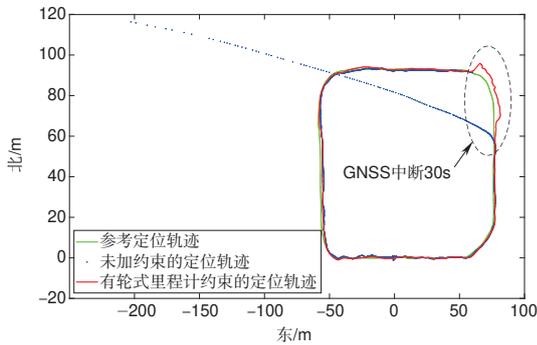


图3 MEMS-INS/GNSS系统与无方向约束的MEMS-INS/GNSS/OD系统的定位轨迹

Fig.3 Location trajectory of MEMS-INS/GNSS system and MEMS-INS/GNSS/OD system without direction constraint

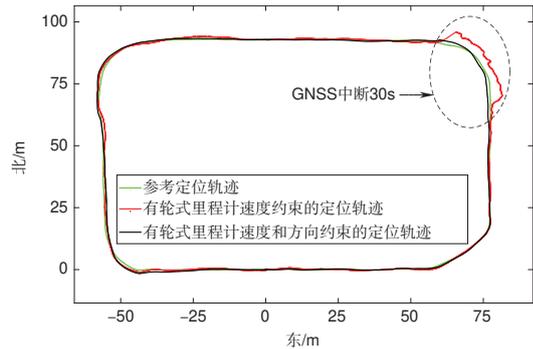


图4 MEMS-INS/GNSS/OD系统中无方向约束与有方向约束的定位轨迹

Fig.4 Location trajectory with and without directional constraints in MEMS-INS/GNSS/OD system

位轨迹;黑色实线表示添加AHRS方向约束的MEMS-INS/GNSS/OD系统的定位轨迹。

图3为MEMS-INS/GNSS系统与MEMS-INS/GNSS/OD系统的融合定位对比图。通过对比可看出,在MEMS-INS/GNSS系统中,GNSS中断会导致整个组合导航系统产生严重的漂移,而加入速度约束的MEMS-INS/GNSS/OD组合导航系统可以抑制位置漂移。图4为未加入AHRS方向约束的MEMS-INS/GNSS/OD系统和加入AHRS方向约束的MEMS-INS/GNSS/OD系统的融合定位对比图。图4的结果显示,在MEMS-INS/GNSS/OD系统中加入AHRS方向约束,能够很好地抑制系统的定位漂移。

表3的数据表示在GNSS中断30s时,无AHRS约束的MEMS-INS/GNSS系统、无AHRS约束的MEMS-INS/GNSS/OD系统和有AHRS约束的MEMS-INS/GNSS/OD系统,它们的平均定位误差(MEAN)和均方根误差(RMSE);以及无

AHRS约束的MEMS-INS/GNSS/OD系统和有AHRS约束的MEMS-INS/GNSS/OD系统,分别相较于无约束MEMS-INS/GNSS系统,定位精度提高的百分比。在GNSS信号中断30s的测试结果中,加入速度约束的MEMS-INS/GNSS/OD系统可以将定位精度提高89.70%,加入AHRS的MEMS-INS/GNSS/OD系统可以将定位精度提高91.15%,且相较于未加入AHRS的系统更加接近参考定位轨迹。

表3 GNSS中断30s时系统的误差值

Table 3 Error value when GNSS is interrupted for 30s

添加约束情况	MEAN/m	RMSE/m	MEAN百分比/%	RMSE百分比/%
无约束	10.11	31.94	-	-
OD	3.13	3.29	69.03	89.70
OD+AHRS	2.63	2.83	73.92	91.15

3.2.2 测试2 试验结果

对有加入AHRS的MEMS-INS/GNSS组合导航系统进行测试。如图5所示,绿色实线为参考定位轨迹,蓝色点表示MEMS-INS/GNSS系统在GNSS信号中断60s时的定位轨迹。可以看出,在GNSS信号中断60s时,系统位置漂移近千米。

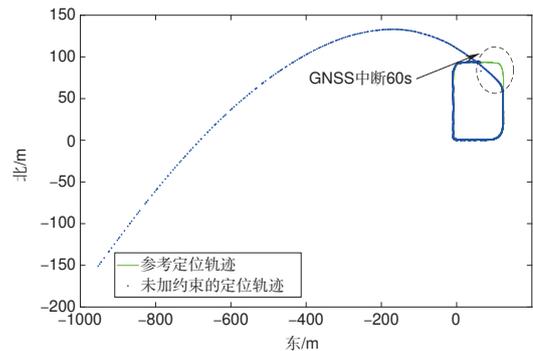


图5 MEMS-INS/GNSS系统的定位轨迹(GNSS中断60s时)

Fig.5 Localization results of MEMS-INS/GNSS system when GNSS is interrupted for 60s

轮式里程计的精度主要与传感器本身精度相关,具有不需要环境信息的特点。视觉里程计需要环境特征点才能进行计算,因此极易受环境影响。在有加入AHRS的MEMS-INS/GNSS组合导航系统中进一步融合轮式里程计和视觉里程计(速度)信息,分析这两种不同类型的观测信息对导航精度的影响。

GNSS中断60s,得到的定位轨迹对比结果如图6所示。图中红色实线表示MEMS-INS/GNSS系统接入轮式里程计的定位轨迹,黄色实线表示MEMS-INS/GNSS系统接入视觉

里程计的定位轨迹。可以看出,在既有 AHRS 进行方向约束又有速度约束的 MEMS-INS/GNSS 系统中,该速度约束的信息由视觉里程计提供比由轮式里程计提供的定位效果好。

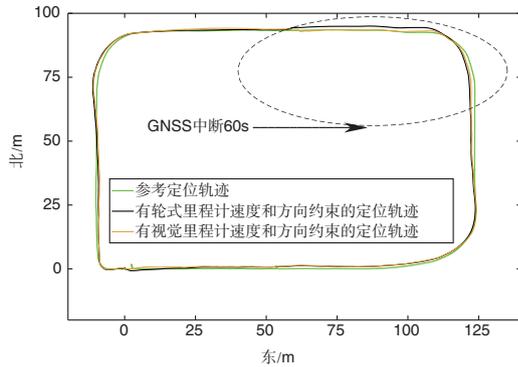


图6 MEMS-INS/GNSS系统接入轮式里程计与接入视觉里程计的定位轨迹对比(GNSS中断60s时)

Fig.6 When GNSS is interrupted for 60s, the positioning trajectory of MEMS-INS/GNSS system with access to wheel odometer and access to visual odometer is compared

因为轮式里程计只对自身运动情况有感知,提供的速度值只是 $x$ 轴方向上的速度值,其横向和垂向的速度都被设为0,即轮式里程计使用时假设车辆在道路上正常行驶时满足车辆运动学约束,但实际上存在车辆侧滑的现象并不满足车辆运动学约束,因此在对轮式里程计建模时存在误差;而视觉里程计能够感知自身运动造成的外部环境变化,而且提供的速度信息是三维的,并具有方向性。此外,视觉里程计不受车轮打滑、车辆侧滑等因素影响,相较于轮式里程计测得的速度值更加准确,所以融合后的结果更加接近参考定位轨迹。在GNSS中断60s的测试中,对加入AHRS的MEMS-INS/GNSS/OD系统(即已接入轮式里程计或已接入视觉里程计),分别计算了东、北、天向的MEAN和RMSE,定位误差数据见表4。

表4 MEMS-INS/GNSS系统接入轮式里程计和接入视觉里程计在东、北、天向上的误差值

Table 4 Error value of MEMS-INS/GNSS system with wheel odometer and MEMS-INS/GNSS system with visual odometer in the east, north and up directions

名称	轮式里程计/m		视觉里程计/m	
	MEAN	RMSE	MEAN	RMSE
东向	1.79	2.11	1.40	1.51
北向	1.17	1.35	0.94	1.13
天向	1.59	1.90	1.60	1.85

计算结果表明,接入视觉里程计的MEMS-INS/GNSS系统比接入轮式里程计的系统在东北天向的精度都有所提高,且接入视觉里程计的系统精度比接入轮式里程计的系统精度提高了16.11%。在GNSS中断60s内,接入轮式里程计系统的最大误差为4.65m(行驶距离的5.21%),接入视觉里程计的系统最大误差为2.38m(行驶距离的2.74%)。

## 4 结论

本文建立了一种可融入里程计的基于误差状态EKF的MEMS-INS/GNSS组合导航系统。试验结果表明,在MEMS-INS/GNSS中加入里程计的速度值,能够解决GNSS短期中断时,组合导航系统的位置漂移问题。在接入轮式里程计的MEMS-INS/GNSS系统中加入AHRS进行方向约束能够有效提高GNSS信号中断时组合导航系统的定位精度。在都加入AHRS进行方向约束的MEMS-INS/GNSS/OD系统中,接入视觉里程计的定位效果比接入轮式里程计的定位效果好。下一步将对EKF中的参数进行优化,并在无人机导航中进行应用测试。

AST

## 参考文献

- [1] Li N B, Guan L W, Gao Y B, et al. Indoor and outdoor low-cost seamless integrated navigation system based on the integration of INS/GNSS/LIDAR system[J]. Remote Sensing, 2020, 12(19): 21.
- [2] Zuo Z, Yang B, Yue C, et al. Study of simulation platform for BDS/INS/CNS deep integration navigation[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2020, 2020(1): 1-11.
- [3] Chiang K W, Le D T, Duong T T, et al. The performance analysis of INS/GNSS/V-SLAM integration scheme using smartphone sensors for land vehicle navigation applications in GNSS-challenging environments[J]. Remote Sensing, 2020, 12(11): 19.
- [4] 丁磊, 钟斌, 禹强华, 等. 北斗三频载波相位组合与相对定位研究[J]. 航空科学技术, 2018, 29(1): 16-24.  
Ding Lei, Zhong Bin, Yu Qianghua, et al. Research on phase combination and relative positioning of beidou tri-frequency carrier[J]. Aeronautical Science & Technology, 2018, 29(1): 16-24. (in Chinese)
- [5] 杨兆, 沈作军. 基于扩展卡尔曼滤波的小型固定翼无人机姿态估计方法分析[J]. 航空科学技术, 2017, 28(11): 15-21.

- Yang Zhao, Shen Zuojun. Analysis of attitude estimation method for small fixed-wing UAV based on extended Kalman filter[J]. *Aeronautical Science & Technology*, 2017, 28(11):15-21. (in Chinese)
- [6] Zhang C, Zhao X B, Pang C L, et al. Adaptive fault isolation and system reconfiguration method for GNSS/INS integration [J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 17121-17133.
- [7] Zhou J C, Traugote J, Scherzinger B, et al. A new integration method for MEMS based GNSS/INS multi-sensor systems[C]// *Proceedings of the 28th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation (Ion Gns+ 2015)*, 2015: 209-218.
- [8] Fu L, Hu C Q, Kong L B. A sea-sky line detection aided GNSS/INS integration method for unmanned surface vehicle navigation[C]// *Proceedings of the 30th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation (Ion Gns+ 2017)*, 2017: 1809-1815.
- [9] Lefferts E J, Markley F L, Shuster M D. Kalman filtering for spacecraft attitude estimation[J]. *Journal of Guidance Control and Dynamics*, 1982, 5(5): 417-429.
- [10] Reimer C, Muller F J, Hinuber E L V. INS/GNSS/Odometer data fusion in railway applications[C]// *2016 DGON Inertial Sensors and Systems (ISS)*. IEEE, 2016.
- [11] Ragab M M, Ragab H, Givigi S, et al. Performance evaluation of neural network based integration of vision and motion sensors for vehicular navigation[C]// *Autonomous Systems: Sensors, Processing and Security for Vehicles & Infrastructure 2019*, 2019.
- [12] 肖尧, 阮晓钢, 朱晓庆, 等. 一种微型无人机单目视觉 SVO/INS 组合导航方法[J]. *中国惯性技术学报*, 2019(2):211-219.
- Xiao Yao, Ruan Xiaogang, Zhu Xiaoqing, et al. A monocular vision SVO/INS integrated navigation method for miniature unmanned aerial vehicle is proposed[J]. *Journal of Chinese Inertial Technology*, 2019(2):211-219. (in Chinese)

## Design and Experimental Analysis of INS/GNSS Integrated Navigation System with Odometer

Cui Xiaozhen<sup>1</sup>, Zhou Qi<sup>2</sup>, Wu Dongjie<sup>1</sup>, Zhong Xunyu<sup>1</sup>

1. *Xiamen University, Xiamen 361102, China*

2. *AVIC Xi'an Flight Automatic Control Research Institute, Xi'an 710065, China*

**Abstract:** In order to solve the problem of MEMS-INS/GNSS integrated navigation drift in the environment where the satellite signal is blocked, how to suppress the drift of the navigation error when the GNSS signal is interrupted is studied. Using the EKF information fusion method based on the error state and flexibly accessing the velocity constraints of wheel or visual odometer (OD), a MEMS-INS/GNSS/OD navigation system is established. In the experiment, the influence of adding AHRS and odometer information on the accuracy of navigation and positioning is compared and analyzed. The test results show that in the GNSS intermittent environment, the fusion odometer can overcome the influence of the satellite signal interruption. When the GNSS is interrupted for 30s, the positioning accuracy is increased by 89.70% compared with the MEMS-INS/GNSS navigation system, and the AHRS direction constraint can better suppress positioning drift. In addition, the accuracy of the MEMS-INS/GNSS/OD system using the visual odometer is improved by 16.11% than that of the wheeled odometer.

**Key Words:** extended Kalman filter; satellite-jamming environment; INS; satellite positioning system; integrated navigation

**Received:** 2021-07-15; **Revised:** 2021-09-19; **Accepted:** 2021-11-18

**Foundation item:** Aeronautical Science Foundation of China (201908068003)