

# 基于 ESKF 的 GNSS/INS 组合导航算法研究

唐遥芳<sup>†</sup>

(广东南方职业学院信息学院, 广东 江门 529000)

**摘 要:**介绍了基于 ESKF 算法的 GNSS/INS 组合实现流程,针对 GNSS 和 IMU 在导航定位时存在各自不足,使用了 ESKF 算法对 GNSS/IMU 进行融合估计,通过 IMU 数据进行系统状态预测,通过 GNSS 数据对校正系统状态进行校正。为了验证 ESKF 算法的可行性,在三种场景下进行了实地测试,实验结果显示,使用本算法估计的位置结果跟 GNSS 的观测结果保持一致,在 GNSS 无效和起伏路段也有较好的预测结果。

**关键词:**ESKF;组合导航;松耦合;航迹推算

**中图分类号:**TN967.2

**文献标识码:**A

## Research on GNSS/INS Integrated Navigation Algorithm Based on ESKF

TANG Yaofang<sup>†</sup>

(School of Information, Guangdong Nanfang Institute of Technology, Jiangmen, Guangdong 529000, China)

**Abstract:** This paper mainly introduces the combined implementation process of GNSS/INS based on ESKF algorithm. In view of the shortcomings of GNSS and IMU in navigation and positioning, ESKF algorithm is applied to fusion estimation of GNSS/IMU. The system states are predicted by IMU data and corrected by GNSS data. In order to verify the feasibility of ESKF algorithm, field tests were carried out in three scenarios. The experimental results showed that the location results estimated by this algorithm were consistent with the GNSS observation results, and good prediction results were also obtained in invalid GNSS and unrolling road sections.

**Key words:** ESKF; integrated navigation; loosely-coupled; dead reckoning

随着智能驾驶行业的快速发展,人们对运动载体的导航定位精度要求越来越高。导航技术是确定载体的位置和速度或航线的方法,而定位是确定载体的空间位置坐标,是导航的子集。定位技术可分为两类基本技术方法:直接定位与航位推算。直接定位是指通过信号或者周围的环境特征直接确定位置,最主要的代表就是 GNSS;航位推算是通过元器件监测运动载体的车速、转向、线速度、角速

度,在已知初始位置的情况下,确定当前的位置,最主要的元器件包括里程计、INS 等<sup>[1]</sup>。

GNSS 和 INS 各自有不同的优势。GNSS 基本原理是通过 GNSS 接收机与四颗以上的卫星进行通信并计算距离后,通过三角测量得到 GNSS 的实际位置。INS 是基于航迹推算法,利用加速度计和陀螺仪分别测出载体平移与旋转参数,来实现导航功能。GNSS 具有高精度的特性,误差范围能

达到厘米级别,但在 GNSS 受障碍物、建筑物遮挡等不利情况下,定位精度会受影响。INS 是全自主的导航系统,不受外部影响,有较高的输出频率,但 INS 内部进行积分计算时,会不断地累计误差,长时间导航误差会不断发散<sup>[2]</sup>。

## 1 GNSS/INS 组合

充分利用 GNSS 和 INS 能很好地互补两者的不足,当 GNSS 信号中断时,可以使用 INS 的线速度和角速度进行位置的计算;GNSS 信号有效时,则抑制 INS 的发散。基于 GNSS 和 INS 互补的特性,通过一些估计算法对两者进行组合,使最终获取的位置和速度更准确和平滑,同时也解决了 GNSS 信号中断时的定位问题。

根据 GNSS/INS 的组合方式,可分为松耦合、紧耦合和深耦合<sup>[3-4]</sup>。松耦合是指 GNSS 和 INS 各自独立运行,GNSS 将位置、速度等数据作为观测输入到滤波器,与 INS 的运算结果进行求差,对 INS 的误差结果进行修正后,输出组合后的位置、速度和姿态值。紧耦合是利用 INS 的位置、速度信息来估计 GNSS 的伪距和伪距率,与 GNSS 的观测值进行比较,用差值构造观测方程,经卡尔曼滤波,获得精确的导航解。深耦合采用适量跟踪的思想,将 GNSS 的信号跟踪与 INS 误差发散抑制合并为一个组合,深入 GNSS 接收机内部,完成信号跟踪的组合。

## 2 误差状态卡尔曼滤波

误差状态卡尔曼滤波(ESKF)将系统状态量分为真实状态、名义状态和误差状态,真实状态由名义状态和误差状态的相加所得<sup>[5]</sup>。名义状态是理想化的系统状态,没有考虑 INS 的噪声和扰动,而误差状态则包含了噪声和扰动。ESKF 不对真实状态进行估计,而是用线性化的方式对误差状态进行估计。ESKF 定义的系统状态量包括位置  $p$ 、速度  $v$ 、姿态  $q$ 、加速度偏置  $a_b$ 、角速度偏置  $\omega_b$ 。

### 2.1 ESKF 测量更新

使用 GNSS 观测得到的坐标位置校准 ESKF 的预测更新观测方程:

$$y = h(x) + v \quad (1)$$

式中, $v$  为量测噪声, $v \sim N(0, V)$ ,  $h(x)$  为测量状态函数, $y$  为 GNSS 量测得到的位置值。

卡尔曼增益:

$$K = PH^T (HPH^T + V)^{-1} \quad (2)$$

系统状态协方差矩阵更新:

$$P \leftarrow (I - KH)P(I - KH)^T + KVK^T \quad (3)$$

误差状态更新:

$$\delta x \leftarrow K(y - h(x)) \quad (4)$$

### 2.2 ESKF 预测更新

根据当前时刻 INS 获取到的  $a_m$ 、 $\omega_m$ ,更新名义状态运动学方程中的  $p$ 、 $v$ 、 $q$ 。

$$p \leftarrow p + v\Delta t + \frac{1}{2}(R(a_m - a_b) + g)\Delta t^2 \quad (5)$$

$$v \leftarrow v + (R(a_m - a_b) + g)\Delta t \quad (6)$$

$$q \leftarrow q \otimes q\{(\omega_m - \omega_b)\Delta t\} \quad (7)$$

误差状态协方差矩阵更新:

$$P \leftarrow F_x P F_x^T + F_i Q_i F_i^T \quad (8)$$

$F_x$  为误差状态转移矩阵,  $F_i$  和  $Q_i$  分别为噪声传递矩阵和噪声协方差矩阵。

### 2.3 ESKF 流程图

ESKF 的流程图如图 1 所示,若系统接收不到 GNSS 数据,预测过程将会持续进行系统状态和协方差矩阵的预测。

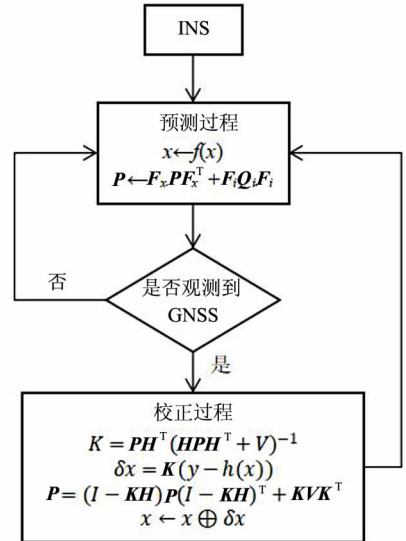


图 1 ESKF 实现流程图

## 3 实验与结果分析

在 AGV 小车上搭建了数据采集平台,该平台搭载了 GNSS 模块和 INS 模块,GNSS 模块的数据发布频率为 50 Hz,INS 模块的数据发布频率为 20 Hz。为验证 ESKF 算法的有效性,取 GNSS 的观测位置与 ESKF 预测位置进行比较,设 GNSS 的首次观测位置为原点(0,0)。

采集了三种场景下的原始数据进行分析,场景一:平地,全程能观测到 GNSS 数据(图 2);场景二:平地,GNSS 数据中途缺失(图 3);场景三:泥石路,全程能观测到 GNSS 数据(图 4)。

在图 2~图 4 中,上半部分子图表示 GNSS 轨迹,下半部分子图表示 ESKF 预测轨迹,实线和虚线对应位置  $x$  和  $y$  的值,横坐标为数据的时长(单位:s),纵坐标为  $(x,y)$  相对原点的偏移距离(单

位:m)。

从图 2 可见,ESKF 预测的车体位置与 GNSS 轨迹基本保持吻合。

在场景二,为了模拟 GNSS 的信号丢失,从时刻 128 s 开始,到时刻 154 s 为止,ESKF 仅以 INS 数据进行预测,GNSS 数据未有进行校正。通过对比可见,ESKF 预测的车体位置与 GNSS 轨迹基本保持吻合。

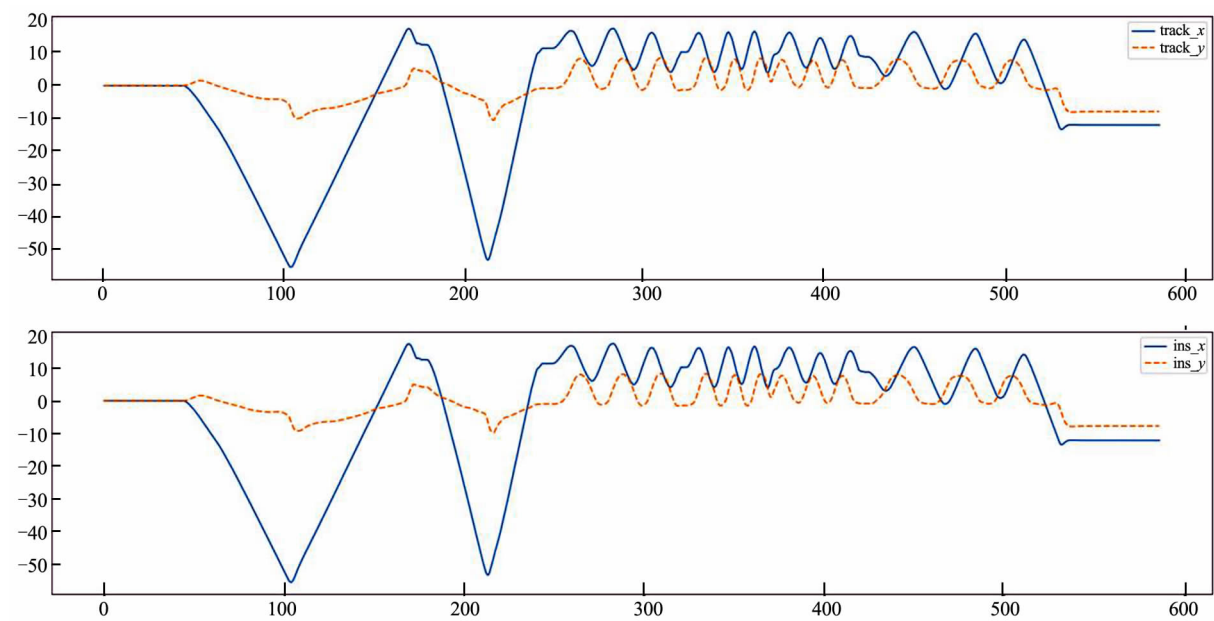


图 2 场景一

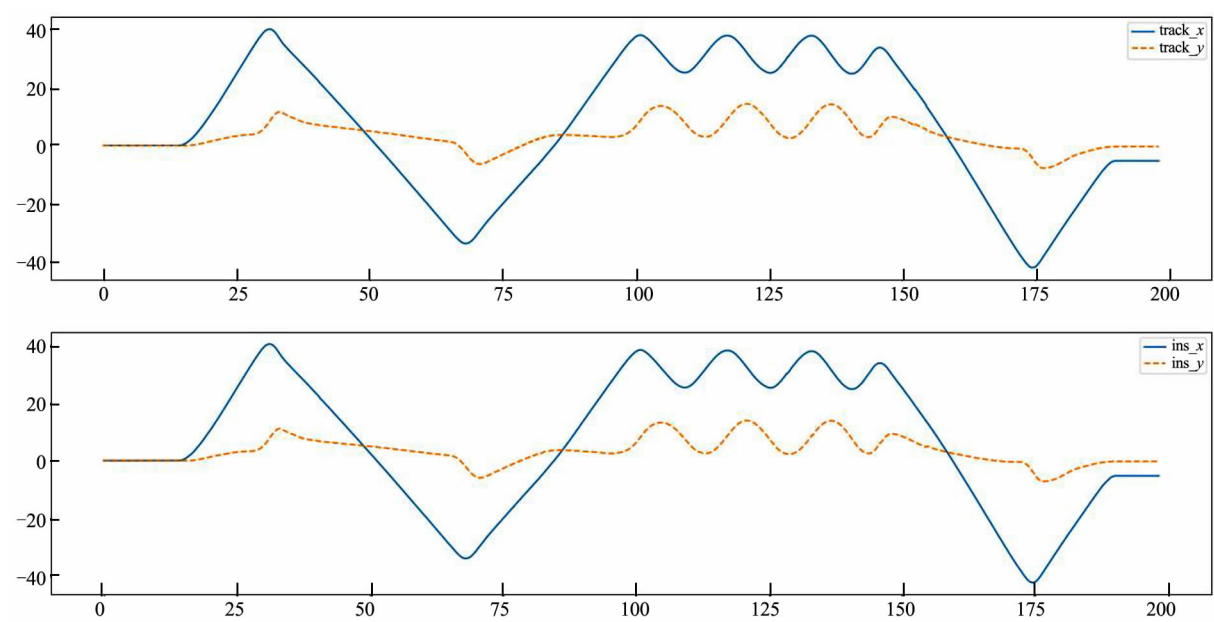


图 3 场景二

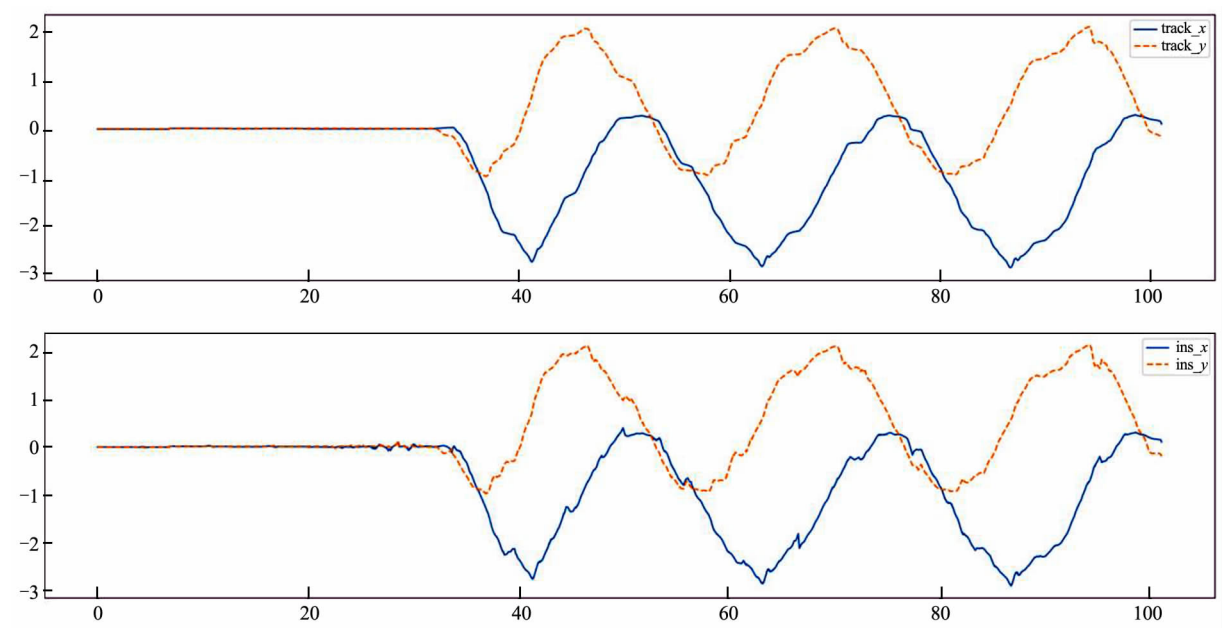


图 4 场景三

场景三为有地势起伏的泥石路,通过比对发现,ESKF 预测结果与 GNSS 轨迹大致接近,但是 GNSS 的观测结果较为平滑,ESKF 受 INS 的噪声和累计误差影响,预测结果与 GNSS 轨迹相比有轻微的跳变。

为了能更好地评价 ESKF 预测位置与 GNSS 的参考轨迹的误差,使用单向距离<sup>[6]</sup> (One Way Distance)进行评价。

设  $p, q$  分别为轨迹  $r_1, r_2$  上的点,  $|r_1|$  为轨迹  $r_1$  上点的个数,  $d_E(p, q)$  表示  $p, q$  的欧几里得距离。

$$D(r_1, r_2) = \frac{1}{|r_1|} \int_{p \in r_1} d(p, r_2) dp$$

(9)

$$d(p, r_2) = \min_{q \in r_2} d_E(p, q)$$

(10)

分别求取  $D(r_1, r_2)$  和  $D(r_2, r_1)$ , 然后取平均值, 可得轨迹  $r_1, r_2$  的单向距离。

$$d_{OWD}(r_1, r_2) = \frac{1}{2} \times [D(r_1, r_2) + D(r_2, r_1)]$$

(11)

表 1 为三个场景与 GNSS 轨迹(参考轨迹)的单向距离,通过比对发现,ESKF 在三个场景的估计误差都维持在厘米级别,其中场景一表现最佳,在 GNSS 丢失情况下,ESKF 在场景二相比场景一误差提升了 23%。场景三表现最差,但 ESKF 预测结果与参考轨迹始终保持一致,没有出现发散的情况。

表 1 ESKF 与参考轨迹的单向距离 (m)

| 测试场景 | 实验结果  |
|------|-------|
| 场景一  | 0.051 |
| 场景二  | 0.063 |
| 场景三  | 0.089 |

4 结 论

本文选用了 ESKF 对 GNSS/INS 进行融合估计,并分别在 GNSS 正常、GNSS 异常、起伏路段三种场景下进行 ESKF 的估计分析。综合来看,ESKF 估计的结果与真实轨迹依然会存在厘米级别的偏差,并且在起伏路段,ESKF 的估计结果会有轻微的跳变,但 ESKF 算法在保证实时性的基础上保证了一定的精度,在实时性有要求的系统中会有较好的使用场景。

参考文献

[1] 严恭敏. 捷联惯导算法及车载组合导航系统研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2004.

[2] 于德新, 杨兆升, 刘雪杰. 基于卡尔曼滤波的 GPS/DR 导航信息融合方法[J]. 交通运输工程学报, 2006, 6(2): 65—69.

[3] 赵俊梅. GPS/SINS 组合导航系统滤波算法研究[D]. 太原: 中北大学, 2006.

[4] GROVES P D. Principles of GNSS, inertial, and multisensor integrated navigation systems[J]. IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine, 2015, 30(2): 26—27.

[5] J SOLA J. Quaternion kinematics for the error-state Kalman filter[J]. arxiv preprint arxiv:1711.02508, 2017.

[6] LIN B, SU J. One way distance: for shape based similarity search of moving object trajectories[J]. GeoInformatica, 2008, 12: 117—142.