

## 基于 SLAM 的高铁横风检测系统

**摘要：**智能高铁感知系统是国家基础设施信息化建设中势在必行的一步，运用智能系统检测高铁运行时产生的风险是其中最为重要的功能。而强横风是影响高速列车运行的最为严重的灾害之一，同时相较现有局限性较大的方法，SLAM 技术在相近场景下的成功运用体现了较大的迁移价值。本文选取 SLAM 技术中成熟的 VINS-Mono 系统，通过不同场景下的验证，确定该系统的鲁棒性，判断该系统的针对性改进有广阔的应用前景，可以有效解决高铁的横风检测问题。

**关键字：**高铁智能感知、横风检测、SLAM 技术、VINS-Mono 系统

### 1. 研究背景

目前高铁存在很多运行时的风险，而强风是影响高速列车运行的最为严重的灾害之一。我国地域广阔，冬季的寒潮大风，以及夏季的短时雷雨大风、台风和龙卷发生频繁，对客运专线高速列车安全运行影响很大。在强风作用下，客运专线动车组空气动力性能恶化，不仅使列车的空气阻力、升力、横向力迅速增加，还影响高速列车的横向稳定性，严重时将导致列车倾覆，造成重大铁路交通事故。

对于强横风对高铁产生的影响，[1]详细分析了侧风环境下高速列车运行姿态(车体与车轮姿态)的变化，变化到一定程度可能会带来高铁侧翻危险，说明了侧风对高铁运行的显著危险性，也是本次研究的立题意义所在。

### 2. 设计原理

#### 2.1 设计思路

目前已有的研究分析了横风对车辆的影响，[2]通过在动力学模拟得出结论车体中上部比车体下部的横向振动幅度激烈，同时[2]通过列车不同高度处的挂载点的传感器数据证明了横风对高铁的影响可以量化为一定高度处、一定频率模式的横向偏移，偏移量范围为 1~5 厘米。[2]中数据表明，横风下高铁横向振动是蛇形运动下方向随时间变化的微小横向偏移和横风的单方向大幅偏移共同作用的结果。同样，文献[3]、[4]中也通过仿真或实际实验证明了同样的现象。因此高铁横风检测的问题可以等效为检测高铁 1~5cm 左右、随时间小幅度改变的横向偏移。

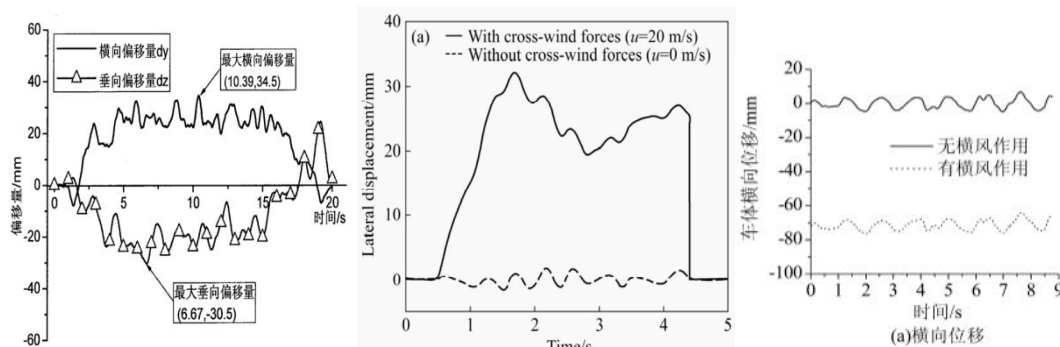


图 1、2、3，从左往右，[2]、[3]、[4]中横风对高铁造成一定频率的横向偏移示意图

本次研究认为通过计算机程序算法实时检测可能的横风危险较为实际。考虑到高速运动的状况下车载摄像、运动检测设备较为容易配备，visual SLAM 技术在横风检测这一问题中便有很大的应用价值。另一方面，在 SLAM 领域，可以结合 IMU 运动信息、车载激光雷达信息和车载摄像头信息的技术已经广泛运用到无人机环境感知、自动驾驶定位与地铁障碍探测。所以，本次研究主要运用 visual SLAM 技术通过研究解决横风检测问题。

SLAM 技术在视觉惯性导航方向目前较为主流的算法实现 VINS 系列已经应用到了无人机的实时轨迹检测。[5]作为 VINS 系列的代表作 VINS-Mono 系统，将单目+惯性系统的

运动轨迹检测能力提升至了精度较高的水平,其核心原理在于通过单目视觉系统提供的关键帧流采用对极几何算法纠正 IMU 的加速度、角加速度在较大的时间区间上积分带来的误差,从而在相对低精度的视觉、运动检测设备的条件下实现高精度检测。该系统很多 SLAM 技术的具体环节都已经成熟,如预积分、基于紧耦合的滑动窗口的关键帧选取,其 1km 内无人机建图结果和真实地图数据间的误差仅在 10cm 以内。因此,本次研究将采用该系统解决横风检测问题

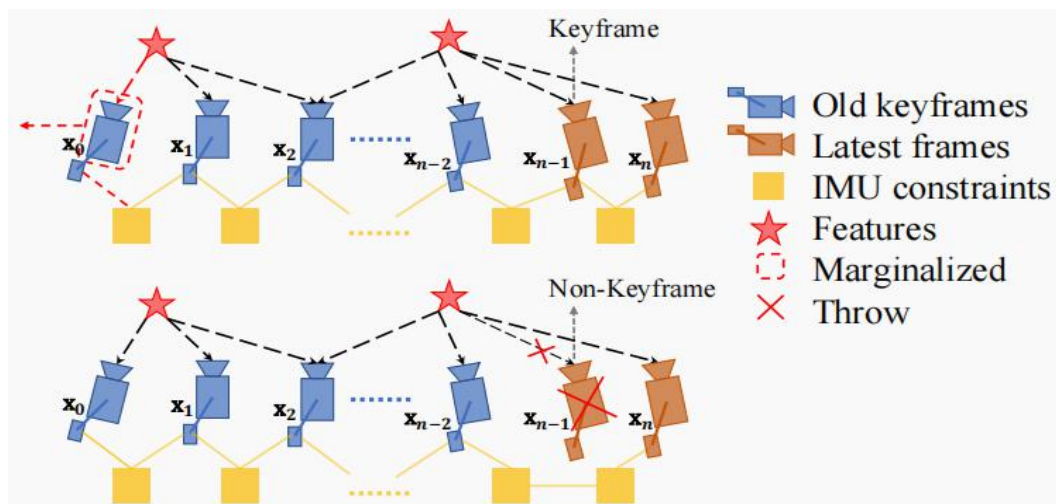


图 4, [5]中 VINS-Mono 系统视觉数据与 IMU 数据互相纠正的算法示意图

## 2.2 研究方法

从运动学原理分析,若知道坐标系中正交的三个方向的加速度与角加速度随时间变化的关系后,在理论上通过两次对时间积分可以计算出运动轨迹。对于实际应用过程中这些运动学数据从常用的 IMU 设备获取后都有一定的误差,因此这些误差在两次积分的作用下会随着时间区间的增大而累积。而 SLAM 系统利用视觉关键帧数据通过对极几何和 PnP 算法计算特征点的位移,并通过 BA 算法与 IMU 数据进行联合非线性优化。这种计算方式虽然精度上低于极短时间内的运动学计算结果,但明显优于在较长时间区间上积分后得到的运动学结果,所以通过视觉数据的计算结果纠正运动学结果产生的误差可以有效的计算出较低误差的运动学轨迹。

因此通过 SLAM 技术检测横风的可行性在于通过视觉纠正惯性数据计算出高精度的运动轨迹、运动状态。

经过文献判读,可以了解到横风对于高铁的影响体现为一定频率的横向偏移,成为为高速行驶时自然的微小、一定频率的蛇形运动与横风的组合。因此,对于 SLAM 系统,横风检测的先决条件为:在运动轨迹整体呈直线的高速运动状态下能够精确检测随时间变化的微小横向偏移。

所以本次研究对于 SLAM 技术的可行性探索主要在于验证程序实现的 SLAM 系统能否满足该条件。

对于该条件的验证,首先,本次研究抽离出两个主要运动特征——高速运动、高频晃动,显然,在这两种运动特征下 SLAM 系统能够精准计算运动轨迹是高速直线运动中检测横向微小偏移的必要条件。为还原这两个主要运动特征,本次实验分别设计了两类运动场景对程序实现 VINS-Mono 系统进行验证。其次,SLAM 系统应该有足够的精确性去检测微小的横向偏移,对于这个性能要求,本次实验同样设计了一组实验对 SLAM 程序进行验证。

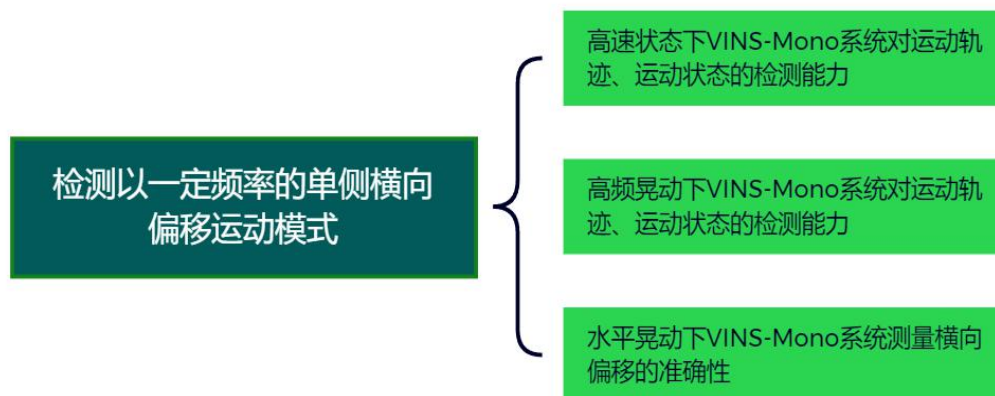


图5 研究思维导图

对于高速运动的特征，本次研究认为低速运动情形下的高帧率视觉-运动数据可以近似为高速状态下的低帧率视觉运动数据验证系统效果，因此采集了这种情形下的视觉惯性数据，模拟高铁高速运动时直行、拐弯的系统效果。

对于高频晃动的场景特征，本次研究则同样进行一定频率晃动进行等效验证。

对于精确性的验证，本次实验通过 SLAM 系统在水平多重‘z’字型运动中‘z’字的数量进行判断。

## 2.3 实验结果

首先，本次实验通过二次开发[5]中已经开源的 VINS-Mono 系统，未改变其核心算法，对其数据接口进行了改动，并编程实现了脚本进行实验过程中自采数据的转换。（程序代码详见附件）。

系统的自采数据集来源于开源手机软件 Marslogger，为确保系统在自采数据集下的有效反馈检测效果，重新在这些验证场景下标定了实验用手机相机的畸变参数、相机内参、图像缩放参数与运动参数（相关参数文件详见附件）。

以下为模拟高速运动情况与高频晃动情况的实验结果：

①接受高帧率自行车高速直行的视觉运动数据后的系统反馈

运动场景如下，为研究人员骑自行车通过地下隧道的情况，有路面上下（截自视频帧）

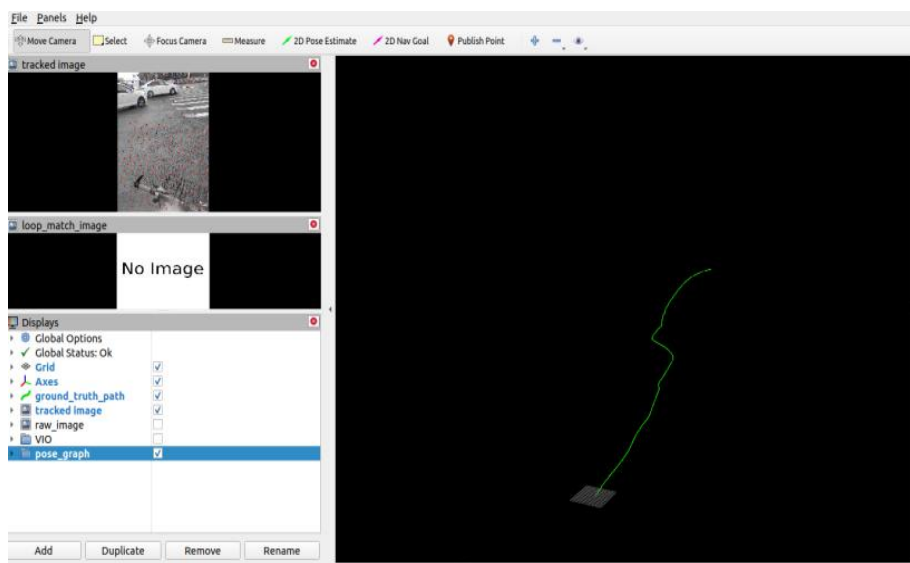


图6 系统运行图

系统对坐标预测如下，符合进入隧道的高度下降上升情况：

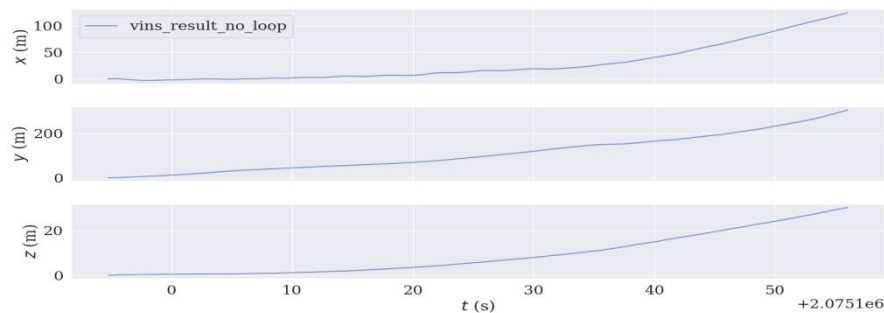


图 7 系统坐标预测结果，从上至下依次为 x、y、z 方向，下同

系统对偏转角度的预测如下，和自行车直行有随机晃动没有大幅度转向的情况基本相符：

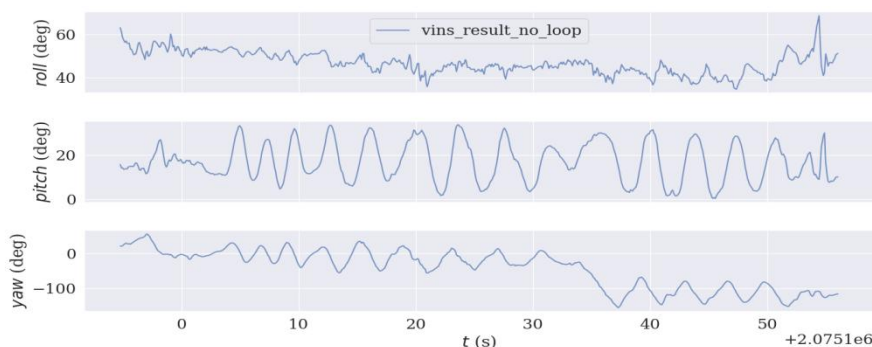


图 8 系统偏转角预测结果，从上至下依次为 roll 横滚角、pitch 俯仰角、yaw 偏航角，下同

系统对轨迹的预测如下，和有路面上下升降的情况相符：

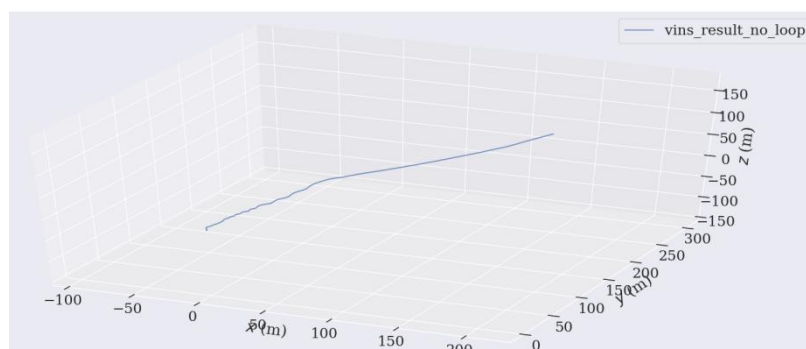


图 9 系统轨迹预测结果

## ②横向高频率晃动的视觉运动数据的系统反馈

运动场景如下，为研究人员在有一些参照物的咖啡馆晃动手机的情况（变化的绿线）

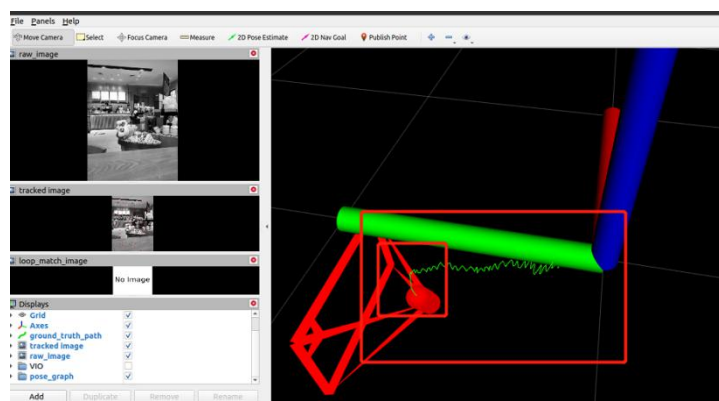


图 10 系统运行图



系统的坐标预测如下，x 轴的横向晃动被很好的检测出来：

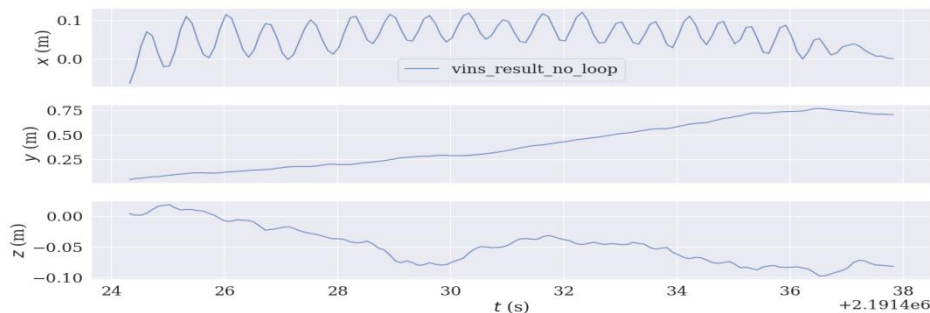


图 11 系统坐标预测结果

系统的偏转角预测如下，较好地反映了晃动：

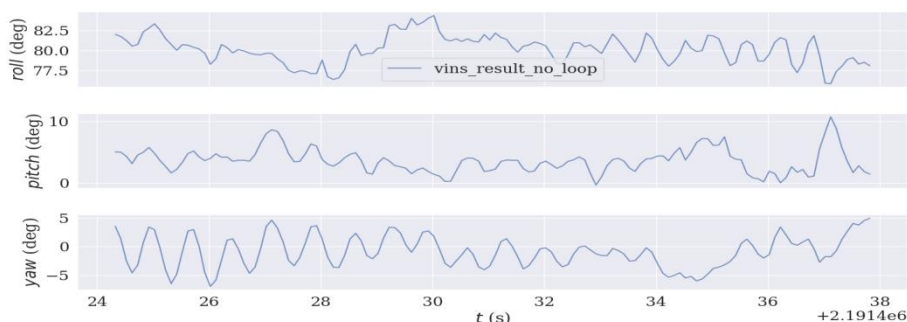


图 12 系统偏转角预测结果

系统的轨迹预测如下，横向晃动在三维情况下被明显反映：

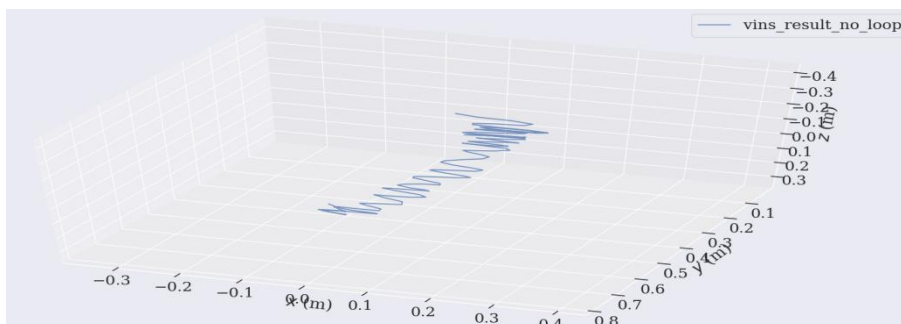


图 13 系统轨迹预测结果

### ③ ‘z’ 字运动的检测

真实运动轨迹（通过处理图中白色识别块坐标所得）为右图，系统预测轨迹为左图：

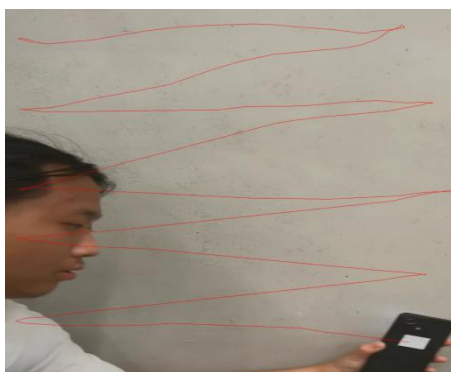


图 14 通过 opencv 色块检测的真实轨迹图

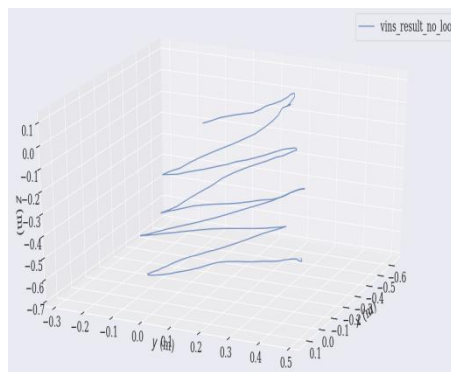


图 15 系统轨迹预测结果

显然, ‘z’ 字型轨迹都为 4 段, 系统的预测轨迹和真实轨迹较为接近。

从以上实验来看, 一定速度下和一定频率下 VINS—Mono 系统都能较精确地检测运动轨迹, 对横向的偏移能够在分米至厘米的级别进行检测, 基本满足了强横风影响下的单侧横向偏移的检测性能要求, 即可以有效通过检测偏移发现横风。

### 3. 创新特色

对于现有通过力学仿真、大量天气地形数据或经验系数建模的方法进行横风检测的种种局限性, 采用在相近领域中用成熟的 SLAM 技术进行迁移应用, 通过计算机算法解决真实工程问题, 推动高铁的智能化建设的落地。

而采用 SLAM 技术中较为成熟的 VINS-Mono 系统实现则使视觉-惯性数据更容易通过车载系统获得, 同时基于紧耦合的 IMU 与关键帧联合进行位姿估计的算法可以有效降低运算量从而保证系统检测的实时性。

### 4. 应用前景(结语)

通过文献判读并结合程序实现验证了 VINS-Mono 系统在高铁运动运动场景下有一定的运动轨迹检测的准确性与鲁棒性, 因此采用 SLAM 技术进行高铁横风检测具有应用价值。而该系统的数据来源仅为车载视觉-惯性设备, 因此可以保证检测的实时性与可行性, 具有工程落地价值。该系统进一步的改进可以有效解决高铁横风检测问题, 从而推进我国高铁的智能化建设。

### 参考文献

- [1] 于梦阁,张继业,张卫华.侧风下高速列车车体与轮对的运行姿态[J].交通运输工程学报,2011,11(04):48-55.DOI:10.19818/j.cnki.1671-1637.2011.04.008.
- [2] 彭伟恺. 高速列车侧风安全性研究[D]. 西南交通大学.
- [3] XIANG Jun, HE Dan, ZENG Qing-yuan.Effect of cross-wind on spatial vibration responses of train and track system.
- [4] 杨吉忠,翟婉明,毕海权. 横风环境下铁路车辆振动响应分析[J]. 系统仿真学报, 2010, 22(9): 2 081-2 084, 2 124.
- [5] T. Qin, P. Li and S. Shen, "VINS-Mono: A Robust and Versatile Monocular Visual-Inertial State Estimator," in IEEE Transactions on Robotics, vol. 34, no. 4, pp. 1004-1020, Aug. 2018, doi: 10.1109/TRO.2018.2853729.