

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2026.03.020

# 用于引水隧洞等封闭空间的自主无人机检测系统

袁曙斌<sup>1</sup>, 何亚文<sup>1</sup>, 李友才<sup>1</sup>, 崔弥达<sup>2</sup>, 吴正发<sup>1</sup>, 李雷<sup>1</sup>

(1. 湖南五凌电力工程有限公司, 湖南长沙 418499; 2. 南京水利科学研究院, 江苏南京 210024)

**摘要:** 在引水隧洞等封闭空间结构中, 由于环境复杂、缺乏 GNSS 信号且人工巡检存在安全风险, 高精度、自动化的检测方法亟需开发。为此, 设计并实现了一套基于激光雷达的自主无人机检测系统, 以 PX4 飞控和机器人操作系统 (ROS) 为软硬件基础, 采用 FAST-LIO2 算法实现激光雷达与惯性测量单元 (IMU) 的紧耦合, 实现无 GNSS 环境下的实时定位与高精度建图。通过 MAVROS 通信桥接, 该系统实现了上层自主决策与底层飞控的协同, 支持全自主路径规划和稳定飞行。结果表明: 该系统能够在黑暗、无卫星信号的隧洞环境中稳定运行, 实现高精度巡检并显著提升操作安全性和效率。该研究为封闭空间的自动化检测提供了可行的技术方案, 并具有推广应用潜力。

**关键词:** 引水隧洞; 自主无人机; 激光雷达; 自主路径规划

中图分类号: TV6

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2026)03-0144-07

## Autonomous Unmanned Aerial Vehicle Detection System for Closed Spaces in Water Diversion Tunnels

YUAN Shubin<sup>1</sup>, HE Yawen<sup>1</sup>, LI Youcai<sup>1</sup>, CUI Mida<sup>2</sup>, WU Zhengfa<sup>1</sup>, LI Lei<sup>1</sup>

(1. Hunan Wuling Electric Power Engineering Co., Ltd., Changsha, Hunan 418499, China;

2. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing, Jiangsu 210024, China)

**Abstract:** In closed-space structures such as water diversion tunnels, the complex environment, lack of GNSS signals, and safety risks associated with manual inspections necessitate high-precision and automated detection methods. To address this issue, an autonomous UAV inspection system based on LiDAR was designed and implemented, with PX4 flight control and the Robot Operating System (ROS) as the hardware-software platform. The system employs the FAST-LIO2 algorithm to tightly couple LiDAR and the inertial measurement unit (IMU), enabling real-time localization and high-precision mapping in GNSS-denied environments. Through MAVROS communication bridging, the system achieves coordination between high-level autonomous decision-making and low-level flight control, supporting fully autonomous path planning and stable flight. Experimental results demonstrate that the system can operate robustly in dark, GNSS-denied tunnel environments, achieving high-precision inspections while significantly improving operational safety and efficiency. This research provides a feasible technical solution for automated inspection in closed spaces and has potential for broader application.

**Keywords:** water diversion tunnel; autonomous UAV; LiDAR; autonomous path planning

随着基础设施老化及定期检测需求的增长, 对混凝土引水隧洞等复杂封闭空间进行安全、高效的巡检变得日益重要。这类环境通常具有空间结构复杂、光照条件差、无全球导航卫星系统 (GNSS) 信号

覆盖等特点<sup>[1-3]</sup>, 不仅增加了人工巡检的风险与难度, 也使得传统依赖外部定位信息的无人机系统难以有效运行。在此类“高、大、险、无信号”的特殊场景中, 实现稳定、精准的自主飞行与环境感知已成为

收稿日期: 2025-12-21

修稿日期: 2026-02-03

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2024YFC3211500); 国家自然科学基金项目 (U2443229)

作者简介: 袁曙斌 (1978—), 男, 工程师, 主要从事无损检测研究工作。E-mail: 360531108@qq.com

通讯作者: 崔弥达 (1994—), 男, 博士, 工程师, 主要从事无人机智能检测研究工作。E-mail: mdcui@nhri.cn

行业亟待突破的技术瓶颈<sup>[4-6]</sup>。因此,开发一种不依赖 GNSS、具备强环境适应性与自主决策能力的无人机系统,具有重要的工程应用价值和现实意义。

传统无人机检测系统<sup>[7-9]</sup>通常高度依赖 GNSS 信号实现定位与导航。在开阔的室外环境中,其性能表现良好;然而,在隧洞、室内及地下等 GNSS 信号严重受限或完全不可用的环境中,系统的定位精度显著下降,甚至可能导致完全失效,从而影响无人机的稳定悬停与预定路径飞行。此外,这类环境常存在特征稀疏、动态光照不足等挑战,传统基于视觉或惯性测量单元(IMU)的辅助导航方法易出现累计误差大、位姿估计漂移等问题<sup>[10]</sup>,难以满足高精度检测任务的要求。

鉴于此,本文旨在研究并提出一套面向全球导航卫星系统(GNSS)信号受限环境的自主无人机检测解决方案。以混凝土引水隧洞等典型特殊场景为应用对象,构建一套基于激光雷达同步定位与建图技术的无人机自主飞行系统。系统总体架构依托机器人操作系统(ROS)与 PX4 飞控固件的协同配合<sup>[11-12]</sup>,核心定位感知采用激光雷达里程计,实现在无 GNSS 环境中的高精度、低漂移实时状态估计。所获定位信息经桥接模块传输至 PX4 飞控,支撑无人机的精准位姿控制。在此基础上,系统借助对环境结构的实时感知能力预置飞行航点,最终完成全自主路径规划与稳定飞行。

## 1 总体设计思路

为实现 GNSS 受限环境下的高精度自主飞行,设计一套分层化、模块化且高度协同的软硬件系统架构,如图 1 所示。

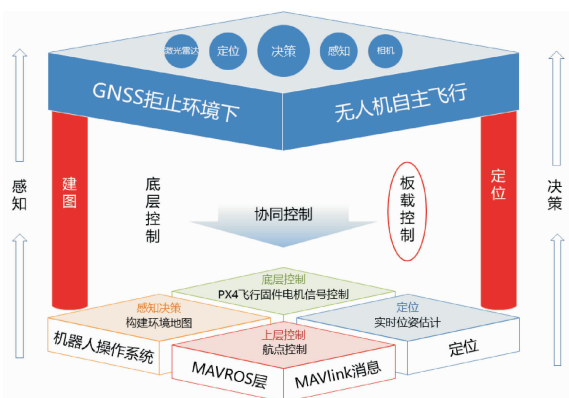


图 1 系统总体方案设计示意图

该架构遵循现代机器人系统设计的核心理念,将复杂的自主飞行任务划分为多个相互独立且高度

协作的子系统。系统以开源飞控 PX4 和机器人操作系统(ROS)作为两大基础平台,通过 MAVROS 协议桥实现高效通信,并集成以 FAST-LIO2 为代表的高性能 SLAM 算法<sup>[13]</sup>,构建了一个从底层实时控制到高层环境感知的完整闭环体系。

### 1.1 系统硬件架构

硬件平台是自主能力的物理载体,其选型与集成直接决定了系统性能的上限。硬件架构主要由无人机平台、机载计算单元和核心传感器套件三部分构成。

#### 1.1.1 无人机平台

**机体选择:**选用具备足够负载能力和续航时间的工业级四旋翼无人机机架。机架需具备良好的刚性和抗振动特性,以减小传感器噪声。

**动力系统:**为保证在复杂环境中的机动性和抗扰动力,高推重比意味着无人机有充足的动力裕度来快速响应控制指令,执行敏捷的避障机动。

**飞控硬件:**选用高性能的 32 位处理器的飞行控制器,这些硬件专为运行 PX4 固件而设计,提供了丰富的传感器接口和强大的处理能力。

#### 1.1.2 机载计算机

**功能属性:**作为无人机的“高层大脑”,负责运行计算密集型的任务,包括 ROS 操作系统、SLAM 算法、路径规划算法、以及我们开发的自定义控制节点。

**性能要求:**考虑到 FAST-LIO2 等现代 SLAM 算法对计算资源的高要求,机载计算机通常选用具备强大 CPU、足够内存以及快速存储的嵌入式计算机。

#### 1.1.3 传感器组件

**激光雷达(LiDAR):**这是系统在 GNSS 拒止环境中的“眼睛”,是实现定位与建图的核心感知设备。

**选型考量:**选用具有较高扫描频率( $\geq 10$  Hz)、较大视场角、较高测距精度(厘米级)和足够点云密度的 3D LiDAR。非重复扫描模式意味着在短时间内,激光束能覆盖更广的区域,有助于更快地捕捉环境细节。

**集成要求:**LiDAR 的安装位置和姿态需要经过精心设计,以最大化有效视野,同时避免被机身或起落架遮挡。

**惯性测量单元(IMU):**提供高频的角速度和线加速度测量,是与 LiDAR 数据进行紧密融合、实现高性能激光惯性里程计的关键。

**选型考量:**选用工业级微机电系统 IMU,其关键指标是低噪声密度和低零偏不稳定性。高质量的 IMU 数据能显著提升运动畸变校正的效果,并在 LiDAR 数据短暂退化时提供更可靠的运动推算。

**时间同步:**LiDAR 和 IMU 之间必须实现硬件级别的时间同步,精度需达到微秒级。通常通过脉冲每秒(PPS)信号和特定的时间协议来实现。

## 1.2 系统软件架构

软件架构是系统智能的体现,建立在 PX4 和 ROS 两大开源生态之上,分别负责不同层级的任务,并通过 MAVROS 这一关键桥梁实现无缝协同。

### 1.2.1 底层核心:PX4 自驾仪

PX4 底层控制在系统中承担着类似“小脑”的功能<sup>[12]</sup>,运行于专用飞控硬件中,其核心职责是维持无人机的姿态稳定,负责执行具有微秒级实时性要求,且直接关系飞行安全的底层关键任务<sup>[14-16]</sup>。该系统以数百赫兹的高频运行姿态控制环和角速率控制环,直接从 IMU 获取原始数据,并借助精密滤波与控制算法计算出精确的力矩指令,最终将其转化为对四个电机的脉冲宽度调制(PWM)信号。通过这一流程,系统能够快速响应内外外部扰动,以极高速度维持飞行器的稳定状态。此外,Offboard 模式是通往自主的门户,对于高级自主系统,飞控的“Offboard”模式是其运作的核心。

### 1.2.2 高层大脑:机器人操作系统(ROS)

ROS 作为运行于机载计算机上的高层中间件,为系统提供了卓越的灵活性与可扩展性<sup>[11]</sup>。它提供了一整套工具和库,支持构建模块化、分布式的机器人应用程序。在本文的设计方案中,核心自主功能模块均以独立 ROS 节点的形式运行,并通过 ROS 的发布/订阅机制实现异步通信。

定位模块提供系统的位置信息,订阅来自 LiDAR 驱动节点的原始点云数据及来自 IMU 驱动节点的原始惯性数据。该节点内部运行 FAST-LIO2 算法,通过紧耦合融合方式,实时高频地输出无人机在全局坐标系下的六自由度位姿与速度估计。规划模块作为系统的“领航员”,接收来自定位模块的实时位姿信息,并依据预设的三维航点序列,生成一条平滑且动力学可行的飞行轨迹。该轨迹在连接各航点的同时,充分考虑了无人机的最大速度、加速度等动力学约束,确保路径的实际可跟踪性。控制模块则作为连接“决策”与“执行”的桥梁,同时订阅规划器发出的目标轨迹和定位模块提供的实时位姿。其核心功能是实现轨迹跟踪控制:在每个控制周期内,

计算无人机当前状态与期望轨迹状态(包括位置、速度和加速度)之间的误差,并基于内部控制器生成最终下发至飞控的具体指令。

### 1.2.3 关键桥梁:MAVROS

ROS 与 PX4 虽紧密协同工作,却分别采用两套不同的通信机制。ROS 节点之间通过基于 TCP/IP 的 ROS 话题及预定义消息类型进行通信;而 PX4 作为嵌入式飞控系统,则采用专为微控制器和低带宽无线链路设计的轻量级二进制协议—MAVLink。由于通信协议和消息格式的异构性,二者无法直接交互,因此需借助 MAVROS 作为双向协议转换桥梁,实现系统间的无缝集成。

MAVROS 在该异构系统中承担关键的“翻译”角色,包括两个方向的通信流程:指令下行路径中,MAVROS 订阅高层控制节点发布的 ROS 话题,提取其中的控制指令,将其按 MAVLink 协议封装为二进制消息,再通过串口或 UDP 等物理链路发送至 PX4 飞控。在状态上行路径中,MAVROS 实时接收来自 PX4 的 MAVLink 遥测数据流,包括 IMU 测量值、电池状态、GPS 信息及系统诊断数据等,将其解析并转换为标准 ROS 消息格式,发布至相应的 ROS 话题,供其他功能节点订阅使用,从而实现整个系统状态的一致性与可观测性。

## 1.3 自主 workflow:感知-规划-行动

整个系统的自主飞行过程构成一个高速闭环,完整体现了机器人学中“感知-规划-行动”的核心范式。该系统通过多传感器融合与协同控制,实现了在无 GNSS 环境下的稳定、精准自主飞行。在感知阶段,LiDAR 与 IMU 分别采集环境点云与高频率惯性数据,并发布至相应 ROS 话题。定位节点接收原始传感器数据,首先利用 IMU 进行点云运动畸变补偿,再通过点云-地图配准与迭代扩展卡尔曼滤波实时估计无人机的高精度位姿,最终输出作为系统统一状态参考的 Odometry 信息。规划节点依据该位姿与预设航点序列,考虑动力学约束的前提下生成平滑的 B 样条轨迹,提供无人机可行的飞行路径。控制节点同步接收轨迹指令与实时位姿,通过误差计算与控制律求解得到期望的控制指令,完成从决策到指令的转换。

行动阶段将控制指令转化为实际飞行行为。控制指令被封装为 MAVROS 消息并发布,经 MAVROS 节点转换为 MAVLink 协议数据包发送至 PX4 飞控。PX4 在 Offboard 模式下解析指令,通过内环控制器计算电机控制量,驱动无人机沿预定轨迹飞行。无

人机的实际运动状态被传感器再次捕获,进入下一轮控制循环。该系统以数十赫兹的频率持续运行,形成高响应、低延迟的闭环控制,从而实现对环境的高度自适应和精确轨迹跟踪。

## 2 四旋翼无人机的建模与控制

为了设计出能够精确、稳定地控制无人机飞行的控制器,首先需建立一个准确的数学模型,将物理世界的复杂飞行现象转化为可以用数学语言描述、分析和预测的理论框架。本节将详细阐述四旋翼无人机的六自由度(6-DOF)刚体模型,涵盖从电机输入到空间运动的全过程<sup>[17]</sup>。

### 2.1 坐标系定义

为精确描述无人机在空间中的位置和姿态,须建立并区分两个关键的坐标系:

(1) 地球坐标系:常被称为东北天(North-East-Down, NED)坐标系或惯性系。这是一个固定在地球表面的参考坐标系<sup>[18]</sup>,假设在单次飞行的短时间内,可以被视为一个绝对静止的惯性参考系。通常定义: $X_G$ 轴指向地理北方向、 $Y_G$ 轴指向地理东方向、 $Z_G$ 轴根据右手定则指向地心方向(即竖直向下)。无人机的绝对位置、速度和加速度等平移运动状态,都在该坐标系下进行描述。

(2) 机体坐标系:这是一个与无人机固连的、非惯性的动坐标系,其原点通常设在无人机的质心。它随无人机一同在空间中平移和旋转。通常定义: $X_B$ 轴指向无人机的机头(前飞)方向、 $Z_B$ 轴垂直于四个螺旋桨所在的平面,指向下方、 $Y_B$ 轴根据右手定则指向机身右侧。作用于无人机的力和力矩,及无人机的角速度,都在该坐标系下进行描述,定义与机体本身的方向密切相关。

无人机的姿态,即机体坐标系相对于地球坐标系的方位,可以通过多种方式表示。最直观的是使用欧拉角:滚转角 $\varphi$ (roll)、俯仰角 $\theta$ (pitch)、偏航角 $\psi$ (yaw)。这三个角度定义了一系列从地球坐标系到机体坐标系的旋转。从机体坐标系下的一个向量转换到地球坐标系下的表示,需要通过一个旋转矩阵 $\mathbf{R}$ 来实现。

### 2.2 动力单元模型

动力单元模型是整个动力学系统的输入端,它描述了从飞行控制器发出的抽象的电机油门指令,如何转化为螺旋桨产生的、作用于机体的最终的力和力矩。

#### 2.2.1 电机模型

单个电机及其驱动器和螺旋桨构成的系统,其动态响应并非瞬时完成。当油门指令变化时,电机转速需要一定时间才能达到新的稳定值。为了捕捉这一关键的动态特性,我们可以将其近似为一个一阶线性系统。该模型描述了油门指令 $\sigma$ (通常归一化到0~1之间)到电机转速 $\omega$ 的动态关系:

$$T_m \frac{d\omega(t)}{dt} + \omega(t) = C_m \sigma(t) + \omega_m \quad (1)$$

式中: $T_m$ 是电机的时间常数; $C_m$ 和 $\omega_m$ 是将油门量映射到电机稳态转速的线性参数,可通过数据拟合得到; $\sigma$ 为油门量。

$T_m$ 代表了电机响应的“惯性”, $T_m$ 越小,电机对指令变化的响应越快,系统动态性能越好。这个参数直接限制姿态控制环的带宽。

当电机达到稳定状态时,转速 $\omega_{ss}$ 与油门量 $\sigma$ 呈线性关系,如下式所示:

$$\omega_{ss} = C_m \sigma(t) + \omega_m \quad (2)$$

这个一阶模型虽然是近似,但它准确地捕捉了电机响应的延迟特性,这对于设计高带宽、高性能的姿态控制器至关重要。

#### 2.2.2 升力与力矩模型

螺旋桨旋转时,通过搅动空气产生向上的推力(升力)和抵抗旋转的反扭矩。

升力:根据翼型理论,单个螺旋桨产生的升力 $F$ 与其转速的平方成正比。这是一个关键的非线性关系:

$$F = c_T \omega^2 \quad (3)$$

式中: $c_T$ 是升力系数,它与螺旋桨的尺寸、螺距、翼型以及空气密度等因素有关。四个旋桨产生的总升力 $T$ 是它们各自升力之和,方向沿机体 $Z$ 轴的负方向:

$$T = c_T (\omega_1^2 + \omega_2^2 + \omega_3^2 + \omega_4^2) \quad (4)$$

力矩:无人机通过控制四个电机转速的差异,来产生作用于机体的三轴控制力矩。对于典型的“X”型布局无人机(电机1、3和电机2、4分别位于对角线):①滚转力矩( $\tau_x$ ),通过增大一侧对角电机(如2、3号)的转速,同时减小另一侧对角电机(1、4号)的转速来产生。②俯仰力矩( $\tau_y$ ),通过增大前方电机(如1、2号)的转速,同时减小后方电机(3、4号)的转速来产生。③偏航力矩( $\tau_z$ ),通过改变顺时针旋转(如1、3号)和逆时针旋转(2、4号)螺旋桨的整体转速差来产生。这利用了螺旋桨旋转时产生的反扭矩。其中 $d$ 是机臂长度(质心到电机轴的水平距离), $c_M$ 是反扭矩系数,与 $c_T$ 类似,也与螺旋桨的空

气动力学特性有关。

$$\tau_x = \frac{\sqrt{2}}{2}dc_T(-\omega_1^2 + \omega_2^2 + \omega_3^2 - \omega_4^2) \quad (5)$$

$$\tau_y = \frac{\sqrt{2}}{2}dc_T(+\omega_2^2 - \omega_3^2 - \omega_4^2) \quad (6)$$

$$\tau_z = c_M(\omega_1^2 - \omega_2^2 + \omega_3^2 - \omega_4^2) \quad (7)$$

### 2.2.3 姿态动力学模型

姿态动力学模型,也称旋转动力学模型,描述了作用在机体上的合外力矩如何改变其角速度和姿态。

欧拉动力学方程:这是描述刚体定点转动最核心的方程。它在机体坐标系下,将施加于刚体的外力矩  $\mathbf{M} = [\tau_x, \tau_y, \tau_z]^T$  与其角加速度  $\frac{d\boldsymbol{\omega}(t)}{dt}$  关联起来。

$$\mathbf{J}\dot{\boldsymbol{\omega}} + \boldsymbol{\omega} \times (\mathbf{J}\boldsymbol{\omega}) = \mathbf{M} \quad (8)$$

式中:  $\mathbf{J}$  是无人机的转动惯量矩阵,描述了其质量分布特性。对于对称的四旋翼,它通常可以简化为一个对角矩阵  $\mathbf{J} = \text{diag}(J_{xx}, J_{yy}, J_{zz})$ ;  $\boldsymbol{\omega} = [\omega_x, \omega_y, \omega_z]^T$  是机体坐标系下角速度向量;  $\boldsymbol{\omega} \times (\mathbf{J}\boldsymbol{\omega})$  项是陀螺耦合项或科里奥利项,它源于动坐标系(机体坐标系)的旋转。这一项是姿态动力学中的一个关键非线性来源,它表明各轴的旋转运动并非完全独立,而是相互耦合的。例如,当无人机同时进行俯仰( $\omega_y \neq 0$ )和偏航( $\omega_z \neq 0$ )运动时,即使没有施加滚转力矩( $\tau_x = 0$ ),也会因为这一耦合项而产生一个滚转方向的角加速度。在低速、小角度飞行时,该项影响较小,但在高速、大机动飞行时则必须予以考虑。

姿态运动学方程:该方程描述了姿态角如何随时间变化,它将机体坐标系下的角速度  $\boldsymbol{\omega}$  转换到地球坐标系下欧拉角( $\varphi, \theta, \psi$ )的变化率(角速度):

$$\begin{bmatrix} \dot{\varphi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \tan\theta\sin\varphi & \tan\theta\cos\varphi \\ 0 & \cos\varphi & -\sin\varphi \\ 0 & \sin\varphi/\cos\theta & \cos\varphi/\cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix} \quad (9)$$

更重要的是,它在俯仰角  $\theta = \pm 90^\circ$  时存在数学上的奇异性,即著名的“万向锁”问题。在该姿态下,  $\cos\theta = 0$ , 导致矩阵中的某些项变为无穷大,方程无解。这意味着欧拉角无法唯一地表示所有三维姿态。为了从根本上规避此问题,在实际的飞行控制系统中,通常采用四元数来表示和计算姿态,因为四元数没有奇异点,能够连续、无歧义地表示任意三维旋转。

### 2.2.4 位置动力学模型

位置动力学模型,也称平移动力学模型,描述了无人机在地球坐标系(惯性系)下的平移运动。其基

础是牛顿第二定律  $F = ma$ 。在地球坐标系下,无人机主要受到两个力的作用:①重力( $G$ ):方向始终沿地球  $Z$  轴正方向(NED 坐标系),大小恒为  $mg$ 。在地球系下表示为  $[0, 0, mg]^T$ ;②升力( $T$ ):其大小为四个螺旋桨升力之和,方向始终沿机体坐标系  $Z$  轴的负方向。为计算它在地球系下的效果,必须通过旋转矩阵  $\mathbf{R}$  将其从机体坐标系转换到地球坐标系。将上述两个力在地球坐标系下叠加,即可得到无人机在地球坐标系下的加速度方程:

$$F_x = -T(\cos\psi\sin\theta\cos\varphi + \sin\psi\sin\varphi) \quad (10)$$

$$F_y = -T(\sin\psi\sin\theta\cos\varphi - \cos\psi\sin\varphi) \quad (11)$$

$$F_z = mg - T(\cos\varphi\cos\theta) \quad (12)$$

$$\ddot{v}_x = -\frac{T}{m}(\cos\psi\sin\theta\cos\varphi + \sin\psi\sin\varphi) \quad (13)$$

$$\ddot{v}_y = -\frac{T}{m}(\sin\psi\sin\theta\cos\varphi - \cos\psi\sin\varphi) \quad (14)$$

$$\ddot{v}_z = g - \frac{T}{m}(\cos\varphi\cos\theta) \quad (15)$$

$$\dot{p}_x = v_x \quad (16)$$

$$\dot{p}_y = v_y \quad (17)$$

$$\dot{p}_z = v_z \quad (18)$$

式中:  $[p_x, p_y, p_z]^T$  是无人机在地球系的位置向量。

这个方程揭示了四旋翼运动控制的核心机制:位置的改变(尤其是水平方向的平移)是通过改变姿态(即改变旋转矩阵  $\mathbf{R}$ )来间接实现的。无人机必须通过倾斜机身(产生非零的滚转角  $\varphi$  或俯仰角  $\theta$ ),使总升力  $T$  在水平方向上产生一个分力,才能实现水平方向的加速。这种位置与姿态之间的强耦合特性,是设计其控制系统的基本出发点。

### 2.2.5 控制理论概述

四旋翼无人机是一个典型的多输入多输出、非线性且强耦合的复杂动力学系统。直接基于其完整非线性模型设计兼具全局稳定性和高性能的控制器在理论和实践上均存在显著困难。因此,工程中通常采用线性化与串级比例-积分-微分(PID)控制相结合的策略,以简化系统设计并实现可靠稳定的飞行控制。

线性化方法通过在特定工作点(如悬停状态)对非线性系统进行泰勒展开并保留一阶项,将原系统近似为线性时不变系统,从而可应用成熟的线性控制理论进行控制器设计与分析。然而,该方法的有效性局限于工作点邻域内,当无人机进行大机动或受强扰动时,线性模型将出现显著偏差,可能导致控制性能下降甚至失稳。为克服上述局限,广泛采用串级 PID 控制架构,其通过“分而治之”策略,将

六自由度控制问题按响应速度分解为多个单输入单输出控制环,实现位置与姿态的层级化解耦控制。

外环位置控制负责将任务指令转化为具体姿态要求:位置PID根据期望与实际位置误差输出期望速度,速度PID进一步根据速度误差计算出期望姿态角与总升力。内环姿态控制则快速响应外环指令:姿态角PID根据角度误差计算期望角速度,角速度PID根据角速度误差直接输出三轴控制力矩。控制分配模块将抽象的力与力矩指令通过混合矩阵求解,转换为各电机的具体转速或脉冲宽度调制信号,完成从控制指令到物理执行的转化。该串级结构需严格遵循“由内到外”的参数整定顺序,内环的快速稳定性是外环控制的基础。该控制架构因结构清晰、鲁棒性强且易于工程实现,已成为PX4、ArduPilot等开源飞控系统的核心控制策略。

### 3 基于激光雷达的定位

在GNSS信号拒止的环境中,基于激光雷达的同步定位与建图(Simultaneous Localization and Mapping, SLAM)是实现无人机自主导航的核心技术<sup>[19-20]</sup>。相较于视觉等其他传感器,LiDAR能够主动发射激光并测量返回时间,从而直接、精确地获取环境的三维几何信息,几乎不受环境光照变化的影响。在大坝廊道、引水洞这类光线昏暗、纹理单一甚至存在粉尘的环境中,视觉传感器性能会急剧下降,而LiDAR则能保持稳健的性能。

SLAM旨在使机器人在未知环境中,通过机载传感器实时构建环境地图并同时估计自身位姿。对于无人机而言,LiDAR SLAM凭借其能够提供精确、高密度的三维几何信息且不受光照变化影响的优势,成为复杂室内及地下空间导航的首选方案。LiDAR-惯性里程计(LIO)作为LiDAR SLAM的重要分支,通过紧密融合LiDAR与IMU数据实现互补增强:LiDAR可提供低漂移的精确几何结构信息,但频率较低(通常为10~20 Hz);而IMU虽以数百赫兹频率输出角速度与加速度,却存在显著的时间累积漂移。LIO通过融合两者优势,实现多方面的性能提升:首先,利用高频IMU数据对LiDAR扫描期间无人机运动引起的点云畸变进行实时补偿,为后续建图与定位提供高质量数据基础;其次,IMU为系统提供高频运动先验,LiDAR则提供低频全局约束,共同抑制漂移,实现高更新率与低漂移的稳定状态估计;最后,在几何特征退化场景(如长直隧道)中,LiDAR约束能力下降,IMU可提供可靠的短时运动推算,而在静止或低速状态下,LiDAR的稳定观测又可

校正IMU因振动引起的噪声,从而提高系统在挑战性环境中的鲁棒性。

#### 3.1 FAST-LIO2 算法详解

FAST-LIO2(Fast LiDAR-Inertial Odometry V2)是一种计算高效且鲁棒的激光雷达-惯性里程计框架<sup>[13]</sup>,其卓越性能源于其紧耦合迭代卡尔曼滤波架构与直接法点云配准策略,尤其适用于计算资源受限的无人机平台。

该框架采用紧耦合迭代扩展卡尔曼滤波作为系统核心,将IMU与LiDAR的原始测量值纳入统一状态估计器中进行联合优化,充分利用传感器间的互补性。与松耦合方法相比,紧耦合不仅修正位姿,还能在线估计并补偿IMU偏置等内在参数,显著提升了在快速运动或感知退化场景中的鲁棒性。针对系统强非线性特点,FAST-LIO2通过多次迭代线性化逼近最优状态估计,有效抑制了系统在一次线性化中因模型偏差引起误差。更关键的是,其通过数学重构将卡尔曼增益的计算复杂度从传统方法中与激光点数相关转化为仅与状态维度(如24维)相关,大幅降低了计算负担,实现了在嵌入式平台上的高频实时运行。

FAST-LIO2的另一大创新在于摒弃传统基于特征提取的配准方法,转而采用“直接法”处理原始点云。该方法将每一个新扫描点直接与全局地图进行匹配,通过最小化点到局部平面的距离实现位姿优化,充分利用全部原始几何信息,避免了特征提取导致的信息损失。这一策略不仅增强了在结构单一或特征稀疏环境(如长直隧道、平整廊道)中的鲁棒性,也省去了针对不同传感器和应用场景繁琐的特征参数调校,显著提高了算法的泛化能力和部署效率。为支持直接法对高密度点云的高效查询,FAST-LIO2集成了增量式K-D树作为动态地图结构。该结构支持高效的点云插入与删除操作,并通过基于子树不平衡阈值的局部重构机制和并行重建技术,在保证地图实时更新的同时,维持了前端状态估计的连续性与低延迟,为直接法配准提供了至关重要的计算基础。

FAST-LIO2通过紧耦合实现多传感器深度融合与高效状态估计,借助直接配准策略提升系统的精度与适应性,并以动态地图结构保障算法在有限资源下的实时运行,共同构成了一套适用于无人机平台的高性能SLAM解决方案。

#### 3.2 FAST-LIO2 的性能与局限

FAST-LIO2系统在计算效率、鲁棒性和定位精度方面表现卓越<sup>[13]</sup>,能够有效支持无人机在复杂

环境中的自主运行。该系统通过高效的卡尔曼增益计算和增量式 K-D 树结构,显著降低了计算复杂度,可在资源受限的机载平台上实现高频实时运算。FAST-LIO2 在高速、大机动飞行及几何结构混乱的环境中仍保持稳健,表现出较强的环境适应性。在公开数据集测试中,轨迹估计精度持续达到或超越同类先进 LIO 系统,为无人机提供了可靠位姿输出。

然而,作为一类里程计系统,FAST-LIO2 仍存在若干固有局限。由于未集成闭环校正模块,系统在长时间运行中会产生累积漂移,但其较高的局部精度足以保障单次飞行范围内的定位可靠性。此外,系统性能高度依赖 LiDAR 与 IMU 之间的硬件时间同步精度,毫秒级同步误差在高速运动中可能被放大为显著位姿偏差,需选用支持硬件同步的高质量传感器。在几何特征退化场景中,系统因约束不足易发生漂移,此时需引入视觉、气压计等多源传感器进行融合以增强鲁棒性。

尽管存在上述限制,FAST-LIO2 在结构相对固定、任务时长有限的场景中仍具有显著应用价值,其高精度、低延迟的里程计能力也使其成为集成回环检测的完整 SLAM 系统的优质前端模块,为无人机导航提供了可靠的基础支撑。

## 4 结 论

(1) 设计并实现了一套用于引水隧洞等 GNSS 拒止环境的自主无人机检测系统。该系统以 ROS 框架和 PX4 飞控为基础,通过集成激光雷达与 IMU,并采用 FAST-LIO2 算法进行紧耦合感知与状态估计,实现了在无 GNSS 信号、光照条件差的封闭空间中的高精度定位与稳定自主飞行。

(2) 该系统具备显著的技术优势:一是通过 FAST-LIO2 算法实现了低漂移、高更新率的位姿估计,克服了传统方法在弱光环境中的局限性;二是采用模块化设计,实现了感知、规划与控制功能的解耦与协同,保证了系统的实时性与可靠性;三是整体方案兼顾了精度与工程可行性,为工业应用提供了有效技术路径。未来可通过引入闭环检测、多传感器融合等方法进一步优化系统性能。

### 参考文献:

[1] 李向前,陈翔,罗建锋,等.基于便携式三维激光扫描仪的隧洞超欠挖检测[J].人民长江,2025,56(04):149-155.

[2] 李长征,李姝昱.水工隧洞钢管衬砌脱空超声检测方法研究[J].人民黄河,2023,45(11):151-155.

[3] 凤媛琴.引水隧洞衬砌结构裂缝检测技术研究[J].水

利科技与经济,2024,30(07):152-154.

- [4] 位敏,李俊杰,徐轶,等.无 GNSS 环境下高混凝土坝表面裂缝无人机定位巡检技术[J].大坝与安全,2025(03):56-64.
- [5] 汤雷,谢炆,宋人心,等.水工隧洞衬砌混凝土质量检测与安全分级评价[J].水利水电技术,2018,49(04):203-209.
- [6] 汤雷,李红,谢炆,等.水工隧洞衬砌裂缝检测与安全分级评价[J].水利水电技术,2018,49(03):135-141.
- [7] 毛业栋,杨林川,占全喜,等.复杂排水隧洞无人机巡检定位导航技术[J].水利水电快报,2025,46(07):45-54.
- [8] 李晓,沈浩,赵毅锋,等.抽水蓄能电站输水隧洞无人机自主飞行技术研究[J].合肥工业大学学报(自然科学版),2021,44(10):1385-1390,1405.
- [9] 张福龙,付小旋,许帅.基于无人机测绘技术的工程地形位移变化研究[J].粘接,2025,52(09):165-168.
- [10] Qin Tong, Li Peiliang, Shen Shaojie. VINS-Mono: A Robust and versatile monocular visual-inertial state estimator[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2018, 34(04):1004-1020.
- [11] Quigley M, Gerkey B, Conley K, et al. ROS: An open-source Robot Operating System [C]//ICRA Workshop on Open Source Software, 2009:1-6.
- [12] Meier L, Honegger D, Pollefeys M. PX4: A node-based multithreaded open source robotics framework for deeply embedded platforms [C]//Proceedings-IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2015:6235-6240.
- [13] Xu Wei, Cai Yixi, He Dongjiao, et al. Fast-lio2: Fast direct lidar-inertial odometry[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2022,38(04):2053-2073.
- [14] 王震,周超,樊永文,等.无人机系统安全性综述[J].计算机科学,2024,51(S1):876-881.
- [15] 庞宇翔,陈泽茂.基于属性访问控制策略的无人机飞控安全方案[J].计算机科学,2024,51(04):366-372.
- [16] 韩凌峰,冯晨誉,陈志,等.面向道路质量检测的四旋翼无人机设计与实现[J].科技与创新,2023,3(08):39-42.
- [17] 全权.多旋翼飞行器设计与控制[M].北京:电子工业出版社,2018:371.
- [18] 王鑫耀,王双甲,何梓君,等.基于地球坐标系的全球惯性导航与组合导航方法[J].测控技术,2022,41(06):112-117.
- [19] 邓开连,唐志伟,刘浩,等.基于激光和视觉 SLAM 的自主导航机器人系统设计[J].计算机工程与设计,2025,46(06):1592-1600.
- [20] 朱新宇,杨远航,韩丹,等.基于鲁棒自适应 ICP 的激光 SLAM 算法[J].自动化应用,2025,66(10):258-263.