

# 基于遥感 GIS 信息融合的测绘机器人 滑模跟踪控制系统

周波, 唐桂彬

(杨凌职业技术学院 交通与测绘工程分院, 陕西 咸阳 712100)

**摘要:** 测绘机器人是实现测绘自动化的执行设备, 测绘机器人的工作空间更为复杂, 给机器人的跟踪控制工作带来较大挑战; 为提高测绘机器人跟踪控制效果, 设计了基于遥感 GIS 信息融合的测绘机器人滑模跟踪控制系统; 加设遥感信息采集器和 GIS 信息采集器, 改装遥感 GIS 信息处理器以及滑模跟踪控制器, 完成硬件系统的优化设计; 考虑信息结构以及信息之间的逻辑关系, 构建系统数据库, 为遥感 GIS 信息提供充足的存储空间; 根据测绘任务生成机器人滑模移动轨迹, 作为机器人的控制目标; 采集测绘机器人实时遥感与 GIS 信息, 利用遥感 GIS 信息融合技术跟踪机器人实时位姿, 对比位姿跟踪结果与生成的控制目标, 计算滑模跟踪控制量, 完成系统的测绘机器人滑模跟踪控制软件功能优化; 系统测试结果表明: 设计系统的控制误差平均值为 1.9 m, 抖振幅值为 0.8 dB, 具有较好的控制效果。

**关键词:** 遥感 GIS 信息融合; 测绘机器人; 滑模; 跟踪控制; 移动轨迹

## Sliding Mode Tracking Control System for Surveying Robot Based on Remote Sensing GIS Information Fusion

ZHOU Bo, TANG Guibin

(Department of Transportation and Mapping, Yangling Vocational & Technical College, Xianyang 712100, China)

**Abstract:** Surveying robots are execution devices for surveying automation, and the workspace of surveying robots is more complex, which brings significant challenges for the tracking and control of robots. To improve the tracking control effectiveness of surveying robots, a surveying robot sliding mode tracking control system based on the fusion of remote sensing and geographic information system (GIS) information is designed. The hardware system was optimized to add the remote sensing information collector and GIS information collector, and modify the remote sensing GIS information processor and sliding mode tracking controller. Considering the logical relationship between information structure and information, a system database was constructed to provide sufficient storage space for the remote sensing GIS information. Based on the surveying task, the sliding mode trajectory for robot movement was generated as the control objective of the robot. The real-time remote sensing and GIS information of the surveying robot were collected, and the remote sensing GIS information fusion technology was used to track the real-time pose of the robot. By comparing the tracking results with the generated control objective, the sliding mode tracking control input was calculated to optimize the software functionality of the surveying robot sliding mode tracking control system. The test results show that the average control error of the system is 1.9 m, the tremor amplitude is 0.8 dB, and it has a good control effectiveness.

**Keywords:** remote sensing GIS information fusion; surveying robots; sliding form; tracking control; motion trail

## 0 引言

测绘机器人利用两个履带结构, 以所需测绘数据为依据, 推动车体运动至所需位置, 从而在方便测图的同时保证车体的稳定。在测绘机器人运动至所需位置的时候, 可以对地理环境信息进行检测, 这一过程简单方便, 不仅缩短了测量时间, 还提高了测量效率。为了保证测绘机器人能够完成相应的测绘任务, 需要保证机器人在实际运动路

线上能够精准的获取测绘信息, 为此相关的机器人运动控制系统引起了学者的广泛关注。

目前发展较为成熟的控制系统包括: 文献 [1] 提出的基于几何不变性和滑动模态算法的机器人控制系统, 利用几何不变量和滑模方法, 对冗余度机器人进行了建模, 并对其进行了运动轨迹的跟踪控制, 对其控制目标进行了优化。文献 [2] 提出的基于变增益自抗扰技术的机器人控制系统, 利用追踪差分方法将运动学逆问题转化为内插

收稿日期: 2023-06-21; 修回日期: 2023-07-25。

基金项目: 2021 年度陕西高等职业教育教学改革研究项目(21GY006); 陕西省教育厅 2022 年度一般专项科研项目(22JK0626)。

作者简介: 周波(1980-), 男, 硕士, 副教授。

引用格式: 周波, 唐桂彬. 基于遥感 GIS 信息融合的测绘机器人滑模跟踪控制系统[J]. 计算机测量与控制, 2024, 32(6): 125-132.

点, 并建立内插点选择准则和碰撞力的目标函数; 基于目标函数选择内插点并对其进行拟合后, 结合机器人动态特性, 设计轨迹跟踪控制器, 实现对运动轨迹的追踪控制。文献 [3] 提出的基于预测算法的机器人控制系统, 以移动机器人的动力学模型为基础, 使用史密斯估计器对控制器与移动机器人之间的信号延迟进行补偿, 降低由于延时造成的定位误差。使用灰色预测模型对移动机器人上传感器获得的数据进行预测, 降低由于时间延迟造成的遥控误操作。然而上述控制系统的控制对象为传统的工业机器人或农业机器人, 将传统控制系统应用到测绘机器人的跟踪控制工作中, 存在明显的控制效果不佳的问题。文献 [4] 提出了一种滑动观测器的滑模控制策略, 该策略具有对包括非线性、参数不确定性和外部扰动在内的扰动的鲁棒性。为了实现这一策略并推导多自由度机器人的运动方程。设计了积分滑模控制的方法来控制多自由度机器人的位置。积分滑模控制器通过应用开关增益来补偿扰动和系统动力学, 实现对运动轨迹的追踪控制并提高系统的跟踪性能。文献 [5] 设计了一个具有自适应增益的最优鲁棒控制系统。该控制器不仅能够对非线性系统进行鲁棒控制、抵抗不确定性和外部干扰, 还能优化二次代价函数。通过自适应规律确定不确定性的上界, 无需手动调整参数。为保证控制器的有限时间稳定性, 应用了李雅普诺夫理论。案例研究表明, 该方法可以有效实现机器人的运动控制。

遥感是一种无接触、长距离的检测技术, 地理信息系统 (GIS, geographic information system) 是对整个或部分地球表层空间中的有关地理分布数据展开采集、储存、管理、运算、分析、显示和描述的技术系统。遥感与 GIS 均能反映地物的位置与空间信息, 但侧重点存在较大差异, 通过遥感 GIS 信息融合, 能够最大程度地反应出地物的实际状态。为此, 应用遥感 GIS 信息融合技术, 并结合测绘机器人特点和需求, 设计滑模跟踪控制系统的硬件。通过图论数据层次法构建属性库与空间索引, 建立遥感 GIS 信息数据库并采用 T-树式索引架构进行储存和索引, 从而实现对空间目标的快速定位。同时, 通过优化设计硬件系统和数据库, 设计测绘机器人滑模跟踪控制软件功能, 以进一步提升系统的跟踪控制效果。并在优化设计硬件系统和数据库的支持下, 设计系统的测绘机器人滑模跟踪控制软件功能。由此提高测绘机器人滑模跟踪控制系统的性能。

### 1 滑模跟踪控制系统硬件设计

由于现有的机器人滑模跟踪控制系统相对成熟, 因此, 本文在设计基于遥感 GIS 信息融合的测绘机器人滑模跟踪控制系统时, 主要结合测绘机器人特点以及工作需求对其进行优化。

#### 1.1 遥感信息采集器

在传统测绘机器人滑模跟踪控制系统的基础上, 加设 Leica GS18 遥感信息采集器, 用来采集测绘机器人所处地

区的遥感信息, 遥感信息采集器的内部结构设计结果如图 1 所示。

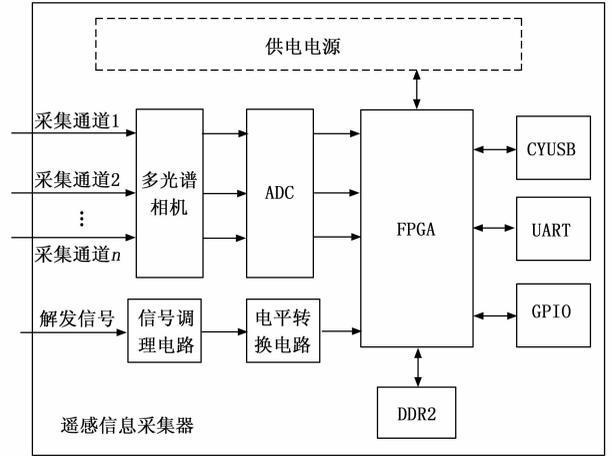


图 1 遥感信息采集器内部结构图

系统中 Leica GS18 遥感信息采集器采集的遥感信息类型为图像, 因此在优化设计采集器中安装一个多光谱相机, 以便获取较高的地表解析度的多波段影像, 并准确捕捉到影像捕捉到的 GPS 坐标<sup>[6]</sup>, 其图像存储格式为 RAW 格式。RAW 格式是指由影像传感器获得的原始资料, 照相机为多波段数据预留了一个外置的触发器, 用于多波段数据的采集。为满足系统对信息类型的格式要求, 在遥感信息采集器中内置一个图像转换设备, 保证系统能够获取信息采集器的图像源和控制权。

#### 1.2 GIS 信息采集器

采用超声波测距元件与 GIS 接收元件相结合的方式, 优化设计 GIS 信息采集器, 优化设计采集器的工作电路如图 2 所示。

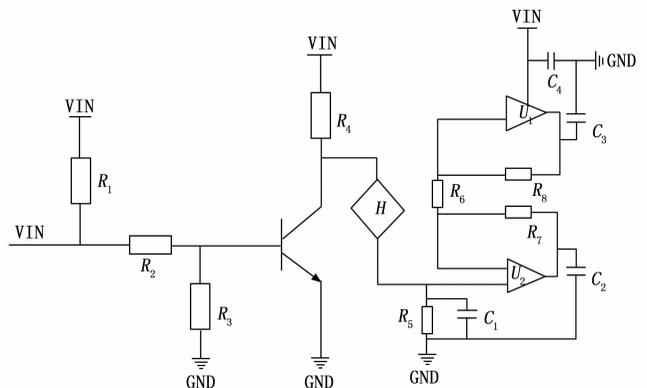


图 2 GIS 信息采集器工作电路图

GIS 信息采集器中的超声波测距元件主要用来获取测绘机器人与周围环境之间的空间信息, GIS 接收元件用来接收地理信息采集信号。GIS 信息采集器采用 MAX706 电路芯片作为核心芯片, MAX706 是一款功耗很小的 CMOS 数据采集芯片, 它的内部电路由一个“看门狗”计时器<sup>[7]</sup>和一

个电压反相器组成“看门狗”计时器, 是一个用上电和复位来实现连续触发的计时器。使用 MAX706 电路芯片设计的 GIS 信息采集器可以在 1.4 s 以内探测到 WCI 管脚, 如果存在高低电平跳跃信号将清零计时器, 并重新计时; 若 GIS 信息采集器在 1.4 s 以内探测到 WCI 管脚, 并且没有高低电平跳跃信号, 此时计时器溢出, WDO 管脚输出一个电平, 触发 MR 人工重置管脚, 保证 MAX706 的重置, 使计时器清零, 保证了机器人 GIS 信息采集程序的重置, 并重新启动采集操作。采集的具体为:

1) 使用超声波测距元件发送一束超声波信号, 并记录接收到的回波的时间来计算距离, 获取测绘机器人与周围环境之间的空间信息。

2) 用 GIS 接收元件接收地理信息采集信号。包括位置坐标、环境参数等。

3) 如果 GIS 信息采集器在 1.4 s 内探测到 WCI 管脚, 并且没有高低电平跳跃信号, 计时器会溢出。此时 WDO 管脚会输出一个电平, 触发 MR 人工重置管脚, 对 MAX706 芯片进行重置, 同时“看门狗”计时器会被清零。

综上所述, 根据 GIS 信息采集器的工作电路, 利用超声波测距元件获取周围环境的空间信息, 通过 GIS 接收元件接收地理信息采集信号, 使用 MAX706 芯片监控和控制 GIS 信息采集器的工作状态和重置。通过此工作电路设计, 实现 GIS 信息的采集并确保了采集数据的准确性。

### 1.3 遥感 GIS 信息处理器

在优化设计遥感信息采集器和 GIS 信息采集器的基础上, 设计遥感 GIS 信息处理器结构, 为控制系统中遥感 GIS 信息融合技术的运行提供硬件支持。优化设计遥感 GIS 信息处理器的组成结构如图 3 所示。

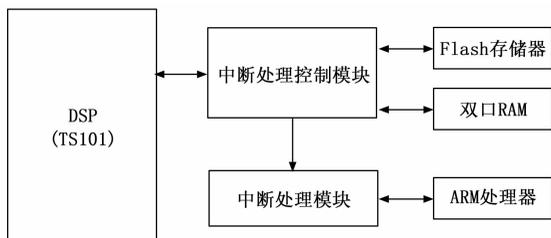


图 3 遥感 GIS 信息处理器结构图

优化设计的遥感 GIS 信息处理器选择 DSP 芯片作为核心处理芯片, 设计一款 32 位浮点数处理器, 其最高处理速度可达到 18 亿次/s, 进一步提高其并行性能。遥感 GIS 信息处理器结合了极宽的内存带宽以及两个操作模块, 为 DSP 的性能设定了一个新的标准。遥感 GIS 信息处理器内部有两个运算块, 每一个运算块包含乘法器、ALU、移位器和寄存器组, 还有两个整数运算和地址产生 IALU。寄存器经过 IALU 生成地址, 最多可获得 4 个 64 位的数据, 而操作块也能对前一个周期中获得的遥感与 GIS 数据进行融合处理<sup>[8]</sup>, 并将处理数据结果进行存储。在该处理器中, 乘法器与 ALU 实现了并行计算, 在一个时钟周期内, 每一

个计算模块都可以实现一个乘法运算和一个加减运算。

### 1.4 测绘机器人滑模跟踪控制器

滑模跟踪控制器是系统跟踪控制功能的执行元件, 其逻辑结构如图 4 所示。

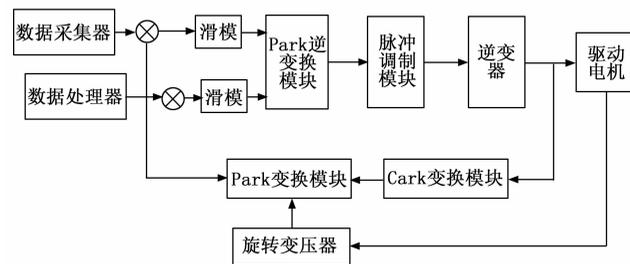


图 4 滑模跟踪控制器逻辑结构图

图 4 表示的优化设计测绘机器人滑模跟踪控制器能够同时实现对测绘机器人位姿的跟踪控制和测绘机器人移动的抖动控制。在系统软件程序的驱动下, 生成控制指令并作用在测绘机器人上<sup>[9]</sup>。测绘机器人滑模跟踪控制器以当前机器人位姿与预期位姿之间的误差作为启动条件, 并在控制器输入端和输出端分别加设一个驱动电机, 为控制器的启动与执行提供动力支持。

## 2 滑模跟踪控制系统数据库设计

遥感 GIS 信息主要描述测绘机器人移动空间中地表物体及其属性, 测绘机器人滑模跟踪控制系统中构建的数据库由多个信息表组成, 具体包括环境 GIS 信息、环境遥感信息、测绘机器人实时信息, 其中环境 GIS 信息表的构建结果如表 1 所示。

表 1 环境 GIS 信息表

字段名称	字段说明	存储结构	几何特征
GIS_Surveyed Point	测量绘制点	Int(10)	点
GIS_Surveying auxiliary line	测绘点辅助线	Int(30)	线
GIS_annotation	测绘点注记	Int(50)	点
GIS_build	设施建筑	Int(20)	面
GIS_Transportation Center Line	交通中心线	Int(30)	线
GIS_Transportation auxiliary points	交通附属点	Int(10)	点

同理可以得出数据库中其他信息表的构建结果, 按照信息表之间的逻辑关系, 生成信息表之间的连接, 完成系统数据库的构建。遥感 GIS 信息数据库的建立采用图论数据层次法, 通过构建属性库与空间索引, 来构建遥感 GIS 信息数据库, 其中包含由点、线、面构成的空间实体与节点, 并不需要构造特征表, 而只需要在每一个实体内部对其进行描述。遥感 GIS 信息数据库采用 T-树式索引架构<sup>[10]</sup>, 以索引方式储存空间目标之最大位移, 由此可根据所设定坐标, 迅速锁定特定的空间目标。由于测绘机器人处于实时运动的状态, 因此数据库中存储的数据处于实时变化的状态, 需要根据机器人的运行情况, 对数据库中的相关数据进行更新与备份处理。

### 3 滑模跟踪控制方法设计

在优化设计硬件系统和数据库的支持下，设计系统的测绘机器人滑模跟踪控制软件功能。

优化系统软件功能的基本运行原理为：根据机器人的测绘任务，生成机器人的滑模移动轨迹<sup>[11]</sup>，并以此作为测绘机器人的跟踪控制目标，初始生成的滑模移动轨迹要求精准定位到测绘机器人各个关节以及执行元件。在启动状态下，通过遥感数据与 GIS 信息，确定测绘机器人在测绘环境中的位姿，并与设置的控制目标进行比对，得出机器人滑模跟踪控制量的计算结果，在控制器的支持下，生成控制指令作用在测绘机器人的各个元件上，完成测绘机器人的滑模跟踪控制，当机器人完成所有测绘任务时，退出跟踪控制程序。

#### 3.1 根据测绘任务生成机器人滑模移动轨迹

测绘机器人滑模移动轨迹的生成采用局部规划的方式，也就是根据测绘任务生成部分移动轨迹，通过对局部轨迹规划结果的融合，得出机器人滑模移动轨迹的生成结果。假设机器人的测绘目标集合为  $X_c = [x_c(i), y_c(i)]$ ，其中， $[x_c(i), y_c(i)]$  为第  $i$  个测绘点的位置坐标。结合测绘机器人的测量区域，得出测绘机器人在执行各个目标点的测绘任务时的移动位置，其中第  $i$  个测绘点对应的机器人移动位置可以表示为：

$$\begin{cases} x_{\text{robot}}(i) = x_c(i) + d \cdot \cos\theta \\ y_{\text{robot}}(i) = y_c(i) + d \cdot \sin\theta \end{cases} \quad (1)$$

其中： $d$  为测绘机器人的测量距离， $\theta$  为测绘机器人的测绘范围角<sup>[12]</sup>，也就是测绘范围两边的夹角。同理可以得出所有测绘目标点对应的机器人移动位置，通过多移动位置融合，得出初始滑模移动轨迹的生成结果，将其标记为：

$$L_0 = \sum_{i=0}^{n_{\text{task}}-1} f_{\text{differential value}}[x_{\text{robot}}(i), y_{\text{robot}}(i)] \quad (2)$$

其中： $f_{\text{differential value}}()$  为插值基函数。对公式 (1) 和公式 (2) 进行联立处理，即可得出机器人滑模移动轨迹的初始生成结果。在此基础上，需要对初始轨迹进行平滑处理<sup>[13]</sup>，计算从起始点  $x_{\text{starting}}$  至移动终点  $x_{\text{destination}}$  之间的整体路径长度，求得路径长度总和，随机产生两个不等的的数据，使得两个数据的大小介于零和路径总长度之间，其中较小数据表示为  $P_A$  和  $P_B$ ，从起始点出发，寻找节点  $P$ ，使得由出发点至该节点之间的距离不小于  $P_A$ ，记录此时节点的前一节点为  $P_{\text{front}}$ ， $P$  与  $P_{\text{front}}$  之间的距离为  $d_{\text{front}}$ ，从起始点至节点  $P$  的距离表示为  $d_{0-P}$ ，那么在轨迹平滑处理过程中产生的新节点可以表示为：

$$L(P_{\text{new}}) = P_{\text{front}} + \frac{(P - P_{\text{front}})(d_{0-P} - P_A)}{d_{\text{front}}}, P \in L_0 \quad (3)$$

按照上述方式对初始生成的所有测绘机器人滑模移动轨迹点进行更新，最终根据滑模控制器的输出结果，并通过多轨迹点的连接，得出移动轨迹的生成结果可以表示为：

$$L = -k[\varphi(e) + \lambda\varphi(e)] \quad (4)$$

其中： $k$  为滑模控制律的增益参数， $\varphi(\cdot)$  为滑膜函数， $k$  为系统状态与期望轨迹之间的误差， $\lambda$  为滑模控制律的增益。

在实际的轨迹规划过程中，还需要考虑测绘环境中的障碍物，若生成的移动轨迹存在通行障碍，则需要对相应的轨迹点进行重新规划，最终将重新规划的轨迹点添加到原轨迹中，若当前轨迹中不存在障碍物，则无需进行重新规划处理，按照上述流程得出测绘机器人的滑模跟踪控制目标。

#### 3.2 测绘机器人实时遥感与 GIS 信息采集与预处理

将待控制的测绘机器人调整至启动状态，采集机器人的实时遥感与 GIS 信息，为机器人实时位置的检测与跟踪提供参考数据<sup>[14]</sup>。在实际测绘机器人信息的采集过程中，遥感信息的采集结果为遥感图像，而 GIS 信息主要为空间位置信息，其中遥感图像的采集结果可以表示为：

$$x_{\text{remote sense}} = L(P_{\text{new}}) \left( \frac{X}{\kappa_{\text{scale}} \mathbf{A}_{\text{attitude}}}, \frac{Y}{\kappa_{\text{scale}} \mathbf{A}_{\text{attitude}}}, \frac{Z}{\kappa_{\text{scale}} \mathbf{A}_{\text{attitude}}} \right) \quad (5)$$

其中： $(X, Y, Z)$  表示测绘机器人所处的实际空间位置， $\kappa_{\text{scale}}$  和  $\mathbf{A}_{\text{attitude}}$  表示遥感成像比例系数和遥感信息采集器的成像矩阵<sup>[15]</sup>。

为保证测绘机器人实时位姿跟踪的精准度，需要保证测绘机器人实时运行数据的采集质量，因此需要在初始采集结果的基础上，对采集数据进行预处理。遥感数据的预处理包括：图像筛选、去雾校正等环节，由于图像转换设备的原因，传输的图像分辨率最大为  $1\,920 \times 1\,080$ ，图像的横向地面分辨率和纵向地面分辨率不一致，需将偏离航向较大偏差的图像剔除，以完成多影像之间的拼接<sup>[16]</sup>。通过参照前后图像变化方向的一致性，剔除出现大角度旋转的图像，实现了对初始遥感图像数据的筛选。另外遥感图像数据的去雾校正处理过程可以表示为：

$$x_{\text{Defogging}} = \frac{x_{\text{remote sense}}}{\lambda} - \kappa_{\text{atmosphere}}(1 - \lambda) \quad (6)$$

其中： $\lambda$  和  $\kappa_{\text{atmosphere}}$  分别表示大气中的均折透率和成分系数。针对 GIS 信息，主要是保证信息格式的统一性，具体处理结果为：

$$x'_{\text{GIS}} = \frac{x_{\text{GIS}} - x_{\text{min}}}{x_{\text{max}} - x_{\text{min}}} \quad (7)$$

其中： $x_{\text{GIS}}$  表示测绘机器人 GIS 信息的初始采集结果， $x_{\text{max}}$  和  $x_{\text{min}}$  分别表示初始信息中的最大值和最小值。重复上述操作，获取测绘机器人在执行测绘任务<sup>[17]</sup>过程中的实时信息及其预处理结果。

#### 3.3 利用遥感 GIS 信息融合技术跟踪机器人实时位姿

以测绘机器人遥感与 GIS 信息的采集与预处理结果为处理对象，根据图 5 表示的信息融合原理，对其进行融合处理。

由于遥感信息与 GIS 信息存储格式存在较大差异，因此遥感 GIS 信息融合采用信息添加的方式，即将 GIS 信息添加到遥感图像中，在实际的融合处理过程中，首先提取

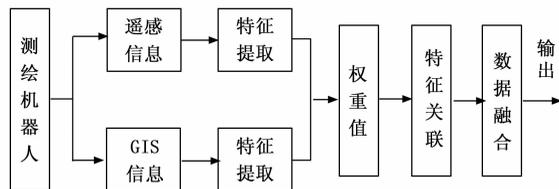


图 5 遥感 GIS 信息融合技术原理图

遥感 GIS 信息特征, 用以计算信息之间的融合权重, 第  $i$  个遥感信息的特征提取结果可以表示为:

$$\tau_{\text{remote sense}}(i) = \sqrt{x_{\text{Defogging}}} \tan^{-1} \left[ \frac{x_y(i)}{x_x(i)} \right] \quad (8)$$

其中:  $x_x(i)$  和  $x_y(i)$  分别为遥感信息在水平和垂直方向上的分量, 同理可以得出 GIS 信息特征的提取结果, 进而得出信息融合权值的计算结果:

$$x_{\text{remote sense}}(i) = x'_{\text{GIS}}(x(i)) \quad (9)$$

其中:  $x(i)$  为采集的遥感 GIS 信息。在此基础上, 得出所有权值的计算结果, 进而得出信息的融合结果为:

$$x_{\text{fusion}} = \sum_{i=1}^{n_{\text{remote sense}}} \tau_{\text{remote sense}}(i) \cdot \omega_i + x'_{\text{GIS}}(j) \cdot \omega_j \quad (10)$$

其中:  $n_{\text{remote sense}}$  和  $n_{\text{GIS}}$  分别为采集量,  $\omega_i$  和  $\omega_j$  分别为第  $i$  个遥感信息特征提取结果  $\tau_{\text{remote sense}}(i)$  与第  $j$  个 GIS 信息特征提取结果  $x_{\text{remote sense}}(i)$  的融合权重<sup>[18]</sup>。利用遥感 GIS 信息的融合结果, 确定测绘机器人在  $t$  时刻的位姿为:

$$\begin{cases} \theta(t) = x_{\text{fusion}}(\theta_0) + \omega \Delta t \\ x(t) = x_{\text{fusion}}(x_0) + v \cos \theta(t) \Delta t \\ y(t) = x_{\text{fusion}}(y_0) + v \sin \theta(t) \Delta t \end{cases} \quad (11)$$

其中:  $x_{\text{fusion}}(\theta_0)$ 、 $x_{\text{fusion}}(x_0)$  和  $x_{\text{fusion}}(y_0)$  分别为遥感 GIS 信息融合数据中的机器人初始姿态角、水平位置和垂直坐标,  $\omega$  和  $v$  分别为测绘机器人的角速度和线速度,  $\Delta t$  为测绘机器人的运动时长<sup>[19]</sup>。公式 (10) 得出的位姿检测结果, 为测绘机器人实时位姿的跟踪结果。

### 3.4 考虑预期轨迹与实时位姿计算滑模跟踪控制量

综合考虑机器人滑模移动轨迹的生成结果与测绘机器人实时位姿的检测结果, 利用公式 (11) 计算滑模跟踪控制量。

$$\begin{cases} \Delta x = \theta(t)[x(t) - x_{\text{robot}}(t)] \\ \Delta y = \theta(t)[y(t) - y_{\text{robot}}(t)] \end{cases} \quad (12)$$

其中:  $x_{\text{robot}}(t)$  和  $y_{\text{robot}}(t)$  为  $t$  时刻测绘机器人的预期位置, 该点在规划的滑模移动轨迹<sup>[20]</sup>中, 根据公式 (11) 得出控制量计算结果的正负情况, 确定测绘机器人的位置调整方向。同理可以得出测绘机器人姿态角控制量的计算结果。

### 3.5 实现测绘机器人滑模跟踪控制

将计算得出的滑模跟踪控制量的计算结果输入到硬件系统的控制器中, 生成相应的控制指令, 并作用在测绘机器人上。测绘机器人的跟踪控制采用滑模变结构, 能够适应测绘机器人的动态性能, 它会根据当前的状态变化, 驱

动着它按照预先设置好的“滑动模式”<sup>[21]</sup>, 以更高的频率、更小的幅度移动。所以, 采用滑模控制时, 首先要保证测绘机器人存在滑模, 其次要确定滑模曲面。一般而言, 在全局控制下, 测绘机器人需要渐近稳定, 并具有良好的动力学性能, 而这一切都取决于滑模式的确定和参数的选择。测绘机器人滑模跟踪控制原理如图 6 所示。

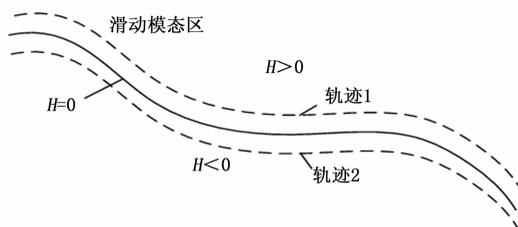


图 6 测绘机器人滑模跟踪控制原理图

从图 6 中可以看出, 滑模面  $H$  将测绘机器人的状态空间分成上下两个部分, 当测绘机器人到达滑模面附近时  $\lim_{H \rightarrow 0} H\dot{H} < 0$  恒成立。其中,  $\dot{H}$  为滑模面的一阶导数。此时证明测绘机器人跟踪控制过程中存在滑动模式, 使得无论系统的初始状态是何值, 测绘机器人总能在有限的时间内达到滑模面, 并在滑模区进行“滑模运动”, 直至达到平衡点<sup>[22]</sup>。在滑模面的支持下, 生成的测绘滑模跟踪控制指令可以表示为:

$$K = \frac{H_1 \Delta_1 + H_2 \Delta_2 + \dots + H_{l-1} \Delta_{l-1} + H_l \Delta_l}{\sqrt{\Delta x + \Delta y}} \quad (13)$$

其中:  $H_i$  和  $\Delta_i$  分别为任意时刻测绘机器人的滑动模态及控制量。通过滑动模态的切换, 在降低测绘机器人运动抖振的前提下, 完成系统对测绘机器人的跟踪控制功能。

## 4 系统测试

为了验证优化设计的基于遥感 GIS 信息融合的测绘机器人滑模跟踪控制系统是否达到预期效果, 设计系统测试实验, 此次实验分别从系统跟踪控制功能和系统控制性能两个方面进行测试, 其中跟踪控制功能的测试, 就是测试在设计系统的控制作用下, 测绘机器人是否能够按照预期轨迹进行运动, 通过测绘机器人位置误差数据的统计, 得出反映系统跟踪控制功能的量化测试结果。而系统控制性能的测试就是测试在跟踪控制过程中, 测绘机器人是否存在抖振现象。此次系统测试实验采用对比测试的方式, 设置的实验对比系统包括: 文献 [1] 基于几何不变性和滑动模态算法的机器人控制系统和文献 [2] 基于变增益自抗扰技术的机器人控制系统, 在实际测试过程中需要控制实验变量的唯一性, 保证跟踪控制任务与控制对象均相同。

### 4.1 测绘机器人选型

此次实验选择 RLP6 型号的测绘机器人作为系统的控制对象, 该机器人为激光影像测绘机器人, 由执行模块、移动模块等部分组成, 其中执行模块也就是执行测绘功能的模块, 具体配置了 360° 的全息摄像头, 还有激光雷达, 同

时激光雷达支持选型,测距为 100 m,高清的全息摄像头可以实现 100% 的场景覆盖,无需初始化,开机即可使用。移动模块由底座和 4 个滚轮组成,是基于遥感 GIS 信息融合的测绘机器人滑模跟踪控制系统的直接控制目标。在实验开始之前,需要检测测绘机器人是否能够在实验环境中正常运行,并保证测绘机器人的可控性。

#### 4.2 准备遥感 GIS 信息样本

选择某城市道路作为测绘机器人的测绘内容,同时该城市道路也是测绘机器人的工作环境,在实验开始之前,首先需要准备城市道路的遥感信息和 GIS 信息,其中部分遥感信息样本如图 7 所示。

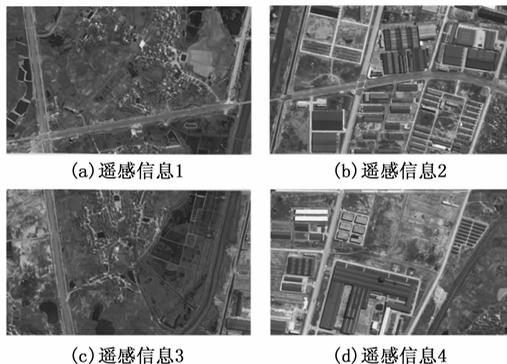


图 7 遥感信息样本示意图

同理可以得出其他遥感信息以及 GIS 信息样本的准备结果,遥感信息和 GIS 信息的准备量分别为 32.4 GB 和 25.6 GB。

#### 4.3 配置控制系统运行与开发环境

优化设计基于遥感 GIS 信息融合的测绘机器人滑模跟踪控制系统采用 Windows 平台作为开发环境,该系统以 VisualBasic6.0 为开发平台,以 Mapx 为主要功能模块,使用 MapInfoprofessional 建立的 MapInfoTable 作为空间数据源。整个系统采用了 MapX+VB 模式。利用 MapX 软件实现了地图的显示,并利用 VisualBasic 软件实现了系统的界面设计和数据库的显示。为保证遥感与 GIS 信息能够应用到测绘机器人滑模跟踪控制系统的跟踪控制工作中,采用 RF 通信模块通信网络,采用 TCP 传输协议,保证命令信息的可靠传输,从而达到对测绘机器人的准确控制。

#### 4.4 生成机器人滑模跟踪控制任务

根据测绘任务生成测绘机器人的滑模跟踪控制任务,为保证实验结果的可信度,生成多条跟踪控制任务轨迹,其中部分控制任务轨迹的生成结果如表 2 所示。

如表 2 所示,表中的坐标点较为规整。按照上述方式可以得出所有机器人滑模跟踪控制任务的生成结果,并标记测绘机器人任意时刻的控制位置坐标。在系统控制过程中,要求测绘机器人的抖振幅度为 0.2 dB。

#### 4.5 描述系统测试过程

在配置好的开发环境中,对优化设计的基于遥感 GIS 信息融合的测绘机器人滑模跟踪控制系统的软件程序进行开

表 2 测绘机器人滑模跟踪控制任务表

控制时间/min	x	y
0.5	480	100
1.0	500	140
1.5	510	180
2.0	520	215
2.5	530	230
3.0	540	265
3.5	550	300
4.0	560	345
4.5	570	370
5.0	580	415

发,并在主测计算机中显示系统初始界面。将选择的测绘机器人样机接入到控制程序中,并将生成的跟踪控制任务输入到控制程序中,完成系统的跟踪控制功能,并输出测绘机器人的实际运行数据。图 8 表示的是基于遥感 GIS 信息融合的测绘机器人滑模跟踪控制系统执行跟踪控制任务轨迹 1 时的运行界面。



图 8 测绘机器人滑模跟踪控制系统界面

按照上述方式可以得出系统执行其他跟踪控制任务时的输出结果。按照上述流程,实现对两种传统控制系统的开发,并得出对比系统控制下测绘机器人的运行结果。

#### 4.6 设置系统量化测试指标

设置测绘机器人滑模跟踪控制误差作为系统控制功能的量化测试指标,其数值结果为:

$$\epsilon_{\text{control}} = |x_{\text{control}} - x_{\text{target}}| + |y_{\text{control}} - y_{\text{target}}| \quad (14)$$

其中:  $(x_{\text{control}}, y_{\text{control}})$  和  $(x_{\text{target}}, y_{\text{target}})$  分别为系统控制作用下测绘机器人的实际运动位置以及设置的控制目标位置。另外,系统控制性能的测试指标设置为抖振幅值,该指标的测试结果为:

$$\varphi(z) = f_{\text{max}}(z) - f_{\text{min}}(z) \quad (15)$$

其中:  $z$  为系统控制下测绘机器人的抖振信号,  $f_{\max}()$  和  $f_{\min}()$  分别为最大值和最小值的求解函数。最终计算出控制误差越小, 证明对应系统的控制功能越优, 抖振幅值取值越小, 说明对应系统的控制功能越好。

#### 4.7 系统测试结果与分析

##### 4.7.1 系统跟踪控制功能测试结果

根据表 2 中得到的机器人任意时刻的控制位置坐标, 对机器人使用 3 种跟踪控制系统进行控制, 完成系统的跟踪控制功能, 并输出测绘机器人的实际运行数据。得出 3 种跟踪控制系统作用下, 反映系统控制功能的测试结果, 如表 3 所示。

表 3 系统控制功能测试数据表

控制时间 /min	不同系统作用下测绘机器人位置					
	基于几何不变性和滑动模态算法的机器人控制系统		基于变增益自抗扰技术的机器人控制系统		基于遥感 GIS 信息融合的机器人滑动模跟踪控制系统	
	$x$	$y$	$x$	$y$	$x$	$y$
0.5	489	107	484	104	480	101
1.0	509	145	505	146	501	140
1.5	517	183	516	181	511	181
2.0	526	211	526	213	520	215
2.5	533	236	535	237	530	233
3.0	547	268	544	262	540	265
3.5	555	304	557	305	552	302
4.0	564	349	563	341	560	345
4.5	579	377	578	374	572	371
5.0	588	410	582	419	584	414

通过表 3 可知, 在 3 种跟踪控制系统作用下, 得到的测绘机器人位置之间的差别较小。将表 2 和表 3 中的数据代入公式 (14) 中, 得出对比控制系统作用下, 测绘机器人的平均控制误差为 11.5 m 和 9.0 m, 而设计系统作用下测绘机器人控制误差的平均值为 1.9 m。

##### 4.7.2 系统跟踪控制性能测试结果

在控制系统作用下, 利用测绘机器人内置的传感器设备获取实时抖振信号, 以此反映系统的跟踪控制性能。图 9 为 3 种控制系统运行下, 测绘机器人抖振信号的测试结果。

根据图 9 可知, 基于几何不变性和滑动模态算法的控制系统的抖振信号波动范围较大, 基于变增益自抗扰技术的机器人控制系统的波动范围次之, 设计的基于遥感 GIS 信息融合的机器人控制系统波动范围最小。由此可知, 设计系统抑振效果最好, 控制性能最优。进一步通过公式 (15) 的计算得出 3 种控制系统下, 测绘机器人的抖振幅值分别为 2.0、1.4 和 0.8 dB。证明了设计系统具有较好的控制效果。

## 5 结束语

随着我国城市化进程的加快, 城市测绘信息数量将急剧增长, 为此, 利用遥感 GIS 信息融合技术, 实现对测绘

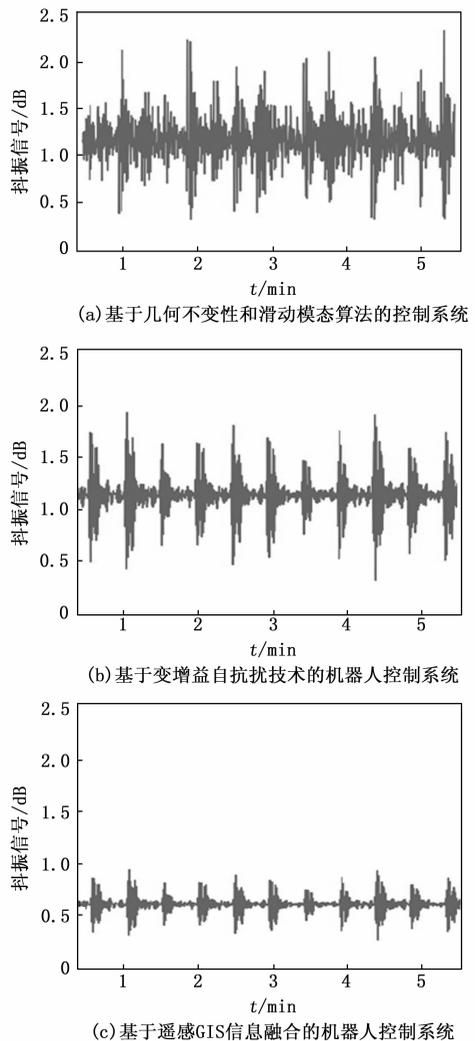


图 9 测绘机器人滑动模跟踪控制性能测试结果

机器人滑模跟踪控制系统的优化设计。在遥感 GIS 信息融合技术的支持下, 能够为测绘机器人实时位置的跟踪提供更充分的数据支持, 从而得出更精准的控制决策。优化设计的测绘机器人滑模跟踪控制系统由硬件、数据库和软件功能三部分组成, 硬件系统为软件功能的实现提供运行支持, 数据库为遥感与 GIS 信息的存储提供空间, 而软件功能部分也就是系统功能的实现部分。测试结果表明, 设计系统最大程度地保证了测绘机器人的工作执行精度, 进而提升了测绘信息的质量。

#### 参考文献:

[1] 姜 苏, 万 刚. 基于几何不变性和滑动模态算法的冗余机器人运动控制研究 [J]. 机床与液压, 2021, 49 (5): 40-44.  
 [2] 张 磊, 鲁 凯, 高春侠, 等. 基于变增益自抗扰技术的机器人轨迹跟踪控制方法 [J]. 电子学报, 2022, 50 (1): 89-97.  
 [3] 刘逢刚, 丁 磊, 肖 利. 基于预测算法的遥控机器人控制系统 [J]. 红外与激光工程, 2021, 50 (s2): 122-130.

