

同行专家业内评价意见书编号：20240858136

## 附件1

浙江工程师学院（浙江大学工程师学院）

### 同行专家业内评价意见书

姓名：    吴霄峰    

学号：    22160132    

申报工程师职称专业类别（领域）：    能源动力    

浙江工程师学院（浙江大学工程师学院）制

2024年03月26日

## 一、个人申报

**（一）基本情况【围绕《浙江工程师学院（浙江大学工程师学院）工程类专业学位研究生工程师职称评审参考指标》，结合该专业类别(领域)工程师职称评审相关标准，举例说明】**

### 一、对本专业基础理论知识和专业技术知识掌握情况

作为浙江大学工程师学院能源动力专业、汽车工程及其智能化项目的学生，我对本专业的的基础理论知识和专业技术知识有着较好的掌握。以下是对这两方面情况的概括：

#### 1. 基础理论知识：

掌握汽车理论、汽车构造、汽车设计等方面的基础理论知识与原理；熟悉汽车智能化技术的发展趋势和应用场景，包括车联网、自动驾驶系统等方面的知识。理解控制系统的基本原理，能独立进行控制器设计并对参数进行整定，包括PID、模糊逻辑、LQR、MPC等；了解电子元件、电路原理及其应用，能够独立进行简单电路设计。

#### 2. 专业技术知识：

深入理解嵌入式系统的架构、工作原理和应用，在实际项目开发中涉及Cortex-M0、Cortex-M4架构的多款国内外MCU与DSP，熟练掌握包括Linux、FreeRTOS、RT-Thread等实时操作系统和裸机的嵌入式编程。熟悉C语言，了解C++、Python、Matlab、汇编，有良好的代码编写习惯。熟悉UART、CAN、SPI、I2C等常用外设接口与PID、卡尔曼滤波等算法，具备机器人设计、组装、开发与调试经验。同时具备一定的硬件与机械知识，能看懂原理图、掌握示波器、焊台、CANoe、Solidworks、Adams等工具的使用方法。此外，在企业实习期间，对于汽车电子控制系统与车辆域控制器也有一定的了解，包括基于AUTOSAR的MBD开发、CAN、车载以太网通信等。

### 二、工程实践的经历

在杭州伟生科技有限责任公司实习期间，参与路谱主动降噪系统嵌入式软件开发工作，为实现100-500Hz频段下的路谱主动降噪功能，主要克服的技术难点如下：1. 超低的数据链路传输时延。2. 多参考信源输入下的负载均衡。3. 多种总线协议的转换等。下面具体介绍详细的工程实践内容：

#### 1. 方案及技术路线：

电动汽车由于没有内燃机汽车发动机噪声的掩蔽效应，使得其路噪问题显得更加突出。使用被动降噪方法降低高频部分的电机噪声和风噪，使用主动降噪方法降低中低频部分的轮胎-路面结构声，由此形成的主被动噪声控制方法相结合的手段，是行业的新型NVH解决方案。本项目采用数字信号处理技术，对输入参考信号与误差麦克风输入信号进行存储、运算、反相等处理后输出至车内扬声器，实现电动汽车路噪的主动降噪功能。

#### 2. 本人承担任务：

作为嵌入式软件开发工程师，在实践环节中围绕主动降噪技术在电动汽车上的应用前景，以嵌入式控制器软件研发为切入点，首先通过对车辆路噪激励源分析的数据采样与预处理，协助对激励源频谱进行分析，随后对嵌入式软件最小原型设计方案进行调研，接着打通数据链路并开发音频接口协议，最后采用实车联合调试与实验等方式，为主动降噪技术的产业化做出了一定贡献。

#### 3. 取得成效与技术应用创新：

该项目采用主动降噪技术结合被动降噪方法，利用数字信号处理技术对电动汽车路噪进行主动降噪。这种方法的创新性在于通过分析声学信号，实时运算并反相输出至车内扬声器，能够有效降低电动汽车在行驶过程中产生的噪声。在传统车内主动降噪技术的基础上，设计了前馈控制的主动降噪算法，并基于数字信号处理技术，利用DSP的高速运算特性完成了低时延下的路谱主动降噪算法的部署与实现，在全局降噪模式下后排座椅降噪量平均比前排高1dB左右，在多种工况下后排50-400Hz频段降噪量达到4dB左右。在VIP座椅局部降噪模式下右耳降噪量略大于左耳，在粗糙沥青路面下取得最优降噪效果，路噪主要频段100-200Hz、200-250Hz均得到有效衰减，在VIP座椅左右耳处50-400Hz频段实现6dB左右降噪效果。不同参考通道方案下降噪效果略有差别，总体均在5dB左右。该技术应用的创新性不仅解决了电动汽车路噪问题，还为主动噪声控制领域带来了新的解决方案。

### 三、在实际工作中综合运用所学知识解决复杂工程问题的案例

主动噪声控制技术应用于汽车领域的研究已经接近三十年，针对发动机噪声的主动控制技术已经相对成熟，并已经开始进入市场的量产阶段，但是路噪主动控制技术还不够成熟。多数路噪主动控制方法只实现了较小频带范围内的降噪效果，且算法与量产技术开发的匹配度有待验证。国内对于该方面的研究大多数处于仿真和实验室环境下的试验验证，与实车的测试工况存在一定的偏差。各个汽车厂商对该技术的引进需求十分迫切，对路噪主动控制问题的研究很有意义。下面以路谱主动降噪系统嵌入式软件开发工作中需要解决的三大主要难点为例进行介绍：

#### 1. 超低的数据链路传输时延：

考虑到主动降噪效果对数据链路传输时延的敏感性，通过对噪声激励源的定位分析、理论计算以及对传感器布置位置与方式的实验，最终确定数据链路的传输时延需要控制在10ms级别。具体实现而言，在控制器内通过开辟环形缓冲区与多线程处理等手段，在保证数据准确性的同时，尽可能减少数据采集、传输、处理阶段的耗时，从而达到4-6ms级别的链路时延，为主动降噪算法的提供了保障与一定冗余，达到该领域的先进水准。

#### 2. 多参考信源输入下的负载均衡：

电动汽车路噪主动降噪技术需要实时采集并处理来自多个传感器的信号，布置于副车架以及悬架的加速度传感器数据对嵌入式控制器带宽有较高的需求，因此需要考虑多参考信源输入下的负载均衡问题。本项目通过直接存储器访问（DMA）技术，使得音频数据在内存与外设寄存器间搬运的过程中无需CPU介入，解决了传统轮询算法存在的负载均衡问题。通过降低CPU使用率的方式，极大地提高了硬件设备的吞吐量，从而实现对16路加速度传感器的支持。

#### 3. 多种总线协议的转换：

在现代汽车中，涉及到的总线协议种类繁多，例如CAN、LIN、ETH等。本项目需要适配多种车型，因而需要对各类总线协议提供支持。通过设计开发可支持CAN、LIN、A2B、TDM、SPI等多种协议转换功能的嵌入式代码，在多种协议格式的数据包中，对数据流的Data字段进行提取、拆分、重组等操作，实现多种车规级协议类型的互相转换功能，以适配不同车型的通信协议。

(二) 取得的业绩(代表作)【限填3项, 须提交证明原件(包括发表的论文、出版的著作、专利证书、获奖证书、科技项目立项文件或合同、企业证明等)供核实, 并提供复印件一份】

1. 公开成果代表作【论文发表、专利成果、软件著作权、标准规范与行业工法制定、著作编写、科技成果获奖、学位论文等】

成果名称	成果类别 [含论文、授权专利(含发明专利申请)、软件著作权、标准、工法、著作、获奖、学位论文等]	发表时间/授权或申请时间等	刊物名称/专利授权或申请号等	本人排名/总人数	备注
论文《机场跑道混凝土摊铺车辆环境感知与轨迹规划系统设计》	其他公开正式刊物	2024年12月28日	现代机械	1/5	已录用, 此稿暂定于2024年第5期(或2024年第6期)刊用, 2024年10月28日(或2024年12月28日)出刊

2. 其他代表作【主持或参与的课题研究项目、科技成果应用转化推广、企业技术难题解决方案、自主研发设计的产品或样机、技术报告、设计图纸、软课题研究报告、可行性研究报告、规划设计方案、施工或调试报告、工程实验、技术培训教材、推动行业发展中发挥的作用及取得的经济社会效益等】

<b>(三) 在校期间课程、专业实践训练及学位论文相关情况</b>	
课程成绩情况	按课程学分核算的平均成绩： 84 分
专业实践训练时间及考核情况(具有三年及以上工作经历的不作要求)	累计时间： 1.6 年 (要求1年及以上) 考核成绩： 86 分 (要求80分及以上)
<b>本人承诺</b>	
<p>个人声明：本人上述所填资料均为真实有效，如有虚假，愿承担一切责任，特此声明！</p> <p style="text-align: right;">申报人签名：吴霄峰</p>	



## 浙江大学研究生院

## 攻读硕士学位研究生成绩单

学号: 22160132	姓名: 吴雪峰	性别: 男	学院: 工程师学院	专业: 能源动力	学制: 2.5年						
毕业时最低应获: 26.0学分		已获得: 26.0学分		入学年月: 2021-09	毕业年月: 2024-03						
学位证书号: 1033532024602168			毕业证书号: 103351202402600394								
学习时间	课程名称	备注	学分	成绩	课程性质	学习时间	课程名称	备注	学分	成绩	课程性质
2020-2021学年春季学期	研究生英语		2.0	免修	公共学位课	2021-2022学年秋季学期	研究生论文写作指导		1.0	82	专业学位课
2020-2021学年春季学期	研究生英语基础技能		1.0	免修	公共学位课	2021-2022学年冬季学期	车辆控制理论与技术		3.0	89	专业学位课
2021-2022学年秋季学期	学科前沿选论		2.0	81	专业学位课	2021-2022学年春季学期	数学建模		2.0	82	专业选修课
2021-2022学年冬季学期	车辆信息传感与通信技术		2.0	90	专业学位课	2021-2022学年春季学期	自然辩证法概论		1.0	84	公共学位课
2021-2022学年冬季学期	智慧能源系统工程		2.0	88	专业选修课	2021-2022学年夏季学期	车辆工程专业课程设计与实践		4.0	87	专业学位课
2021-2022学年秋季学期	中国特色社会主义理论与实践研究		2.0	89	公共学位课	2021-2022学年春季学期	工程伦理		2.0	88	公共学位课
2021-2022学年秋季学期	车辆及发动机测试技术		2.0	84	专业选修课						

说明: 1. 研究生课程按三种方法计分: 百分制, 两级制 (通过、不通过), 五级制 (优、良、中、及格、不及格)。

2. 备注中 "\*" 表示重修课程。

学院成绩校核章:

成绩校核人: 张梦依

打印日期: 2024-04-02



# 论文录用通知

吴霄峰, 张逸飞, 宋雅楠, 卓海清, 熊树生 等作者:



您于 2023 年 11 月向《现代机械》投稿, 编号: 2023—0418,  
**题目:** 机场跑道混凝土摊铺车辆环境感知与轨迹规划系统设计, 经有关专家审定后可以  
在本刊发表。此稿暂定于 2024 年第 5 期(或 2024 年第 6 期)刊用, 2024 年 10 月 28 日(或  
2024 年 12 月 28 日)出刊; 需交纳版面费 1200 元, 版面费按最下方说明进行支付。

**请注意核对以下事项:**

1. 英文正斜体请标明, 图幅尺寸宽度不超过 8cm, 并用黑白色制作, 字符、线条要求清晰、线条粗细按国标;
2. 此文所涉及的内容如果获取了国家级奖、省级奖、国家专利等, 请将复印件扫描件或图片寄给编辑部, 便于本刊申报国家级优秀期刊。此文如是基金项目, 请将基金项目批号的复印件或电子文件通过站内信息寄给编辑部;
3. **请在缴费时一定备注文章编号和第一作者姓名, 并在投稿系统中将缴费有关信息和需要开发票的有关信息详细填写(因出具的发票不能进行更换, 请慎重填写确认无误)。**
4. **请一定添加微信, 微信号: xdjx85951755。**
5. **缴费方式: 银行汇款(包括手机银行): 名称: 贵州省机电研究设计院 账号: 133000156748 开户行: 中国银行贵阳市瑞金支行。**

联系电话: 0851-85951755

<http://xdjx.cbpt.cnki.net>

《现代机械》编辑部

2023 年 11 月 24 日

---

# 机场跑道混凝土摊铺车辆环境感知与轨迹规划系统设计

吴霄峰<sup>1</sup>, 张逸飞<sup>1</sup>, 宋雅楠<sup>2</sup>, 卓海清<sup>2</sup>, 熊树生<sup>1\*</sup>

(1. 浙江大学, 浙江 杭州 310012

2. 福州海卓马克机电设备有限公司 福建 福州 310100)

**摘要:** 在机场混凝土道面无人化施工的工程背景下, 本文针对道面摊铺与后处理车辆所涉及关键技术进行研究, 设计了一种基于多模态传感器的环境感知和轨迹规划系统。通过激光雷达和可见光相机, 对采集到的混凝土道面边界信息进行处理和计算, 最终规划出可引导摊铺机行驶的参考轨迹。环境感知模块采用了基于深度学习的图像检测技术和基于点云的特征提取手段, 采用卡尔曼滤波算法进行多传感器数据融合; 轨迹规划模块通过最小化冲击度的 5 次多项式差值法进行轨迹规划。实验结果表明, 该系统能够实现对道面边界的准确提取, 并规划出一条无碰撞且动力学可行的参考轨迹, 能够满足车辆行驶与施工的需要, 具有一定的应用价值与工程意义。

**关键词:** 履带式车辆 环境感知 传感器融合 轨迹规划

中图分类号: U461.1 文献标识码: A

## **Design of Environment Perception and Trajectory Planning System for Concrete Paving Vehicles on Airport Runways**

Wu Xiaofeng, Zhang Yifei, Xiong Shusheng\*

**Abstract:** Under the context of unmanned construction of airport concrete pavements, this paper focuses on the key technologies involved in pavement paving and post-processing vehicles. A multi-modal sensor-based environment perception and trajectory planning system is designed. Through the laser radar and visible light camera, the collected boundary information of the concrete pavement is processed and computed, ultimately generating a reference trajectory for guiding the paving machine. The environment perception module adopts deep learning-based image detection techniques and point cloud-based feature extraction methods, combining multiple sensor data through the Kalman filter algorithm. The trajectory planning module utilizes a 5th order polynomial interpolation method that minimizes the impact force to plan the trajectory. Experimental results demonstrate that the system can accurately extract the pavement boundary and generate a collision-free and dynamically feasible

---

reference trajectory, meeting the requirements of vehicle travel and construction applications, and has certain application value and engineering significance.

Keywords: Tracked vehicle, Environment perception, Sensor fusion, Trajectory planning.

## 1 引言

我国民用航空领域经过几十年的建设和发展已初具规模,机场数量与密度连年攀升。混凝土滑模摊铺技术目前已逐步被应用于机场跑道、滑行道及停机坪等设施的建设中,因其可以在保证施工质量和效率的同时控制成本,从而在欧美国家得到了广泛应用<sup>[1]</sup>,如图 1 所示。



图 1 滑模摊铺技术及其施工场景

目前国内机场跑道等设施的建设主要采用人工参与,小型机具配合的方式进行,施工质量不一,效率低下且人力成本过高。传统的混凝土摊铺机施工依赖人为布置的标线桩,作业准备时间长且未完全摆脱人工依赖。此外,随着我国机场建设标准的不断提高,普通摊铺机施工的表面质量无法满足施工规范要求,需要人工对其进行后处理,综合来看施工效率依然低下。

针对上述问题,亟需发展新的道面摊铺工艺与手段,实现机场混凝土道面的自动化施工。基于此,本研究开发了一套可自主感知施工环境,完成轨迹规划与控制,实现机场道面自动化施工作业的车辆,并为项目工程化落地奠定了基础。

## 2 环境感知系统设计

### 2.1 多源异构传感器布置与介绍

为了在发挥各类传感器自身优势的同时,弥补单一传感器面对特殊工况的不足,本文选用了激光雷达、可见光相机等传感器,通过多模态传感器数据融合算法,实现了高度集成的环境感知系统。具体而言,选用了型号为 MV-SUA630C-T 的工业相机,配有 6mm 定焦镜头。此外,为了平衡检测效果与成本,采用了

型号为 Livox Mid70 的旋镜式激光雷达。图 2 展示了所采用的传感器。



图 2 传感器三维模型与实物图

环境感知系统安装于摊铺机机身，车辆坐标系、传感器坐标系以及世界坐标系的关系如图 3 所示。图中  $x_w$ 、 $y_w$ 、 $z_w$  分别为世界坐标系的三轴方向； $x_v$ 、 $y_v$ 、 $z_v$  为摊铺机车体坐标系，原点位于摊铺机几何中心； $x_c$ 、 $y_c$ 、 $z_c$  为相机坐标系。通过对各坐标系下传感器的联合标定，实现传感器坐标系的统一。

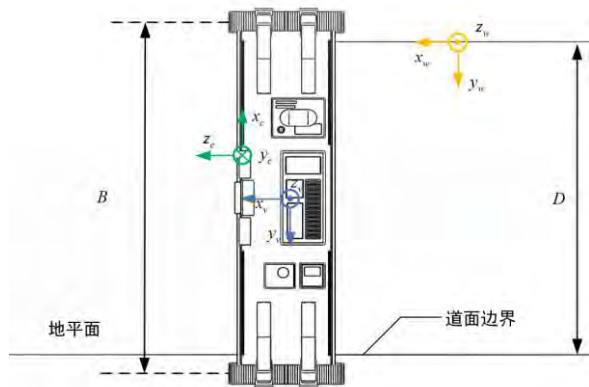


图 3 传感器布局与坐标系建立

在时间同步方面，首先将各传感器的触发时钟源统一为同一时钟进行硬触发。同时，利用软件算法进行数据匹配，以当雷达点云的时间戳为基准，寻找图像缓冲区中时间戳最为临近的一帧图像。时间同步前后的效果示意图如图 4 所示。

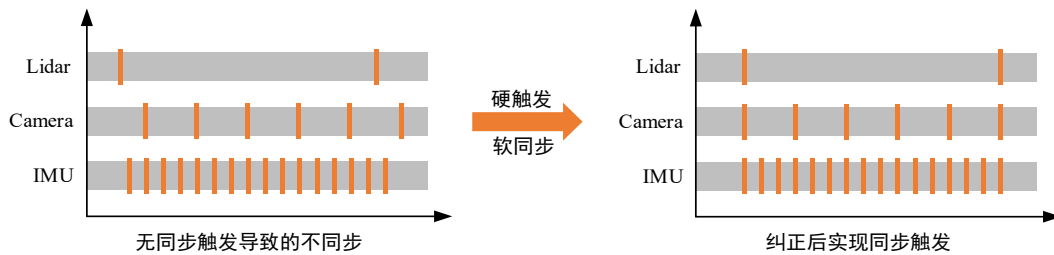


图 4 不同的传感器数据采集异步及同步方法示意图

在空间同步方面，拍摄多张放置于不同位置的标定板并录制点云。通过图像

和点云检测算法提取标定板角点，得到不同传感器坐标系下一组特征点的对应关系，构造方程组并进行优化求解，即可获得相机和激光雷达间的转换矩阵。

## 2.2 基于深度学习的道面边界检测

基于传统视觉的图像目标检测拥有较少的算力消耗，但其面对多变的场景环境和光照条件等客观因素的鲁棒性不好，因此随着神经网络的发展，基于深度学习的图像目标检测技术取得了长足的进步。考虑到道面边界检测任务与车道线检测任务有较多的相似之处，因此本文在 Ultra Fast LaneNet<sup>[2]</sup>的基础上，提出了一种基于行锚框的两阶段检测算法。

该算法根据道面边界可能存在的区域选取合适的 ROI，并将 ROI 区域分割为若干网格。随后按行进行遍历，寻找当前行中可能存在道面边界的网格，并将出现概率最高的网格作为本行的候选网格。随后对每个候选网格采用传统图像检测算法提取出精确坐标。最后对所有网格的结果采用 RNASAC 算法进行拟合，得到图像中的道面边界曲线。图 5 为该算法示意图。



图 5 基于行锚框的道面边界检测算法示意图

在网络结构方面，采用了主副两个分支。主分支用于特征提取，并使用深度残差网络 ResNet 作为 Backbone。损失函数采用了交叉熵损失函数。而副分支则作为图像分割网络，用于提升训练阶段的效果。需要注意的是，在网络推理时，副分支将被隐藏，以提高网络在实际运行时的实时性。网络结构如图 6 所示。



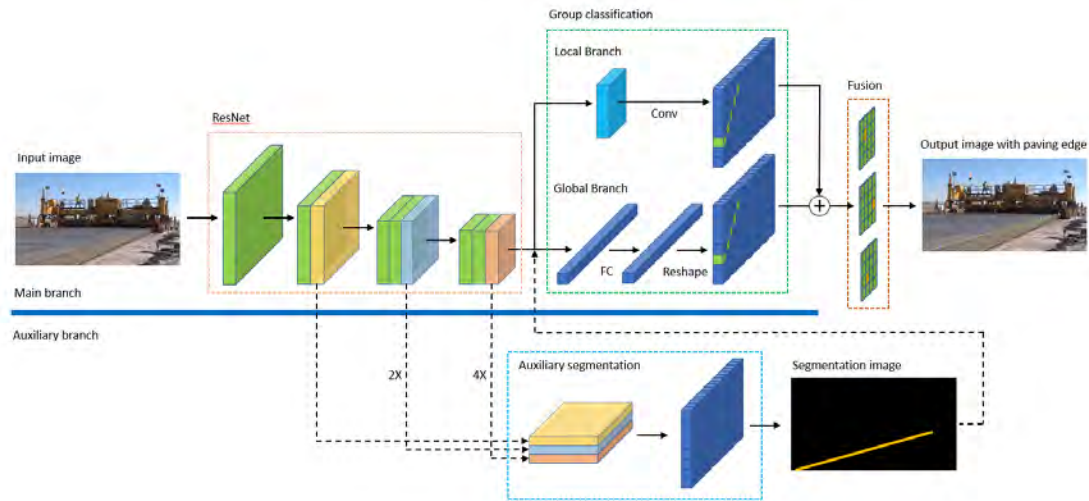


图 6 基于行锚框的道面边界检测算法网络结构示意图

该算法将输入尺寸为  $H \times W$  的图像分割为行高  $h$  和列宽  $w$  组成的网格进行数据降维，对比图像分割算法可以发现，分割算法的计算量为  $H \times W \times (C+1)$ ，而本文的计算量仅为  $C \times h \times (w+1)$ 。且由于网格的尺寸远小于输入图片的尺寸，即  $w \ll W$ ， $h \ll H$ ，因此第一阶段的计算耗时有显著的下降。

基于上述网络所获得的道面边界位置较为模糊，无法满足实际检测精度要求，因此有必要对第一阶段的输出结果进行二次处理。首先利用 Canny 边缘检测算法提取出含有道面边界特征的像素点，随后采用霍夫变换提取道面边界线段。最后选取最靠近锚框中线部分的像素点，作为当前行锚框图片中道面边界的精确位置，并与其余各行的结果一并通过 RANSAC 算法进行道面边界曲线拟合，从而解决了道面边界精确识别的问题。该阶段的详细流程如图 7 所示。



(a) 行锚框原图像

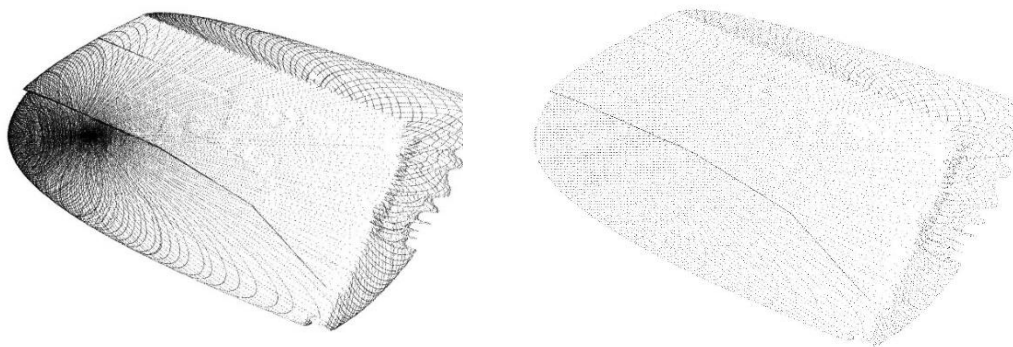
(b) 边缘提取结果

(c) 道面边界及特征点

图 7 道面边界位置精确提取示意图

### 2.3 基于激光雷达点云的道面边界检测

由于点云分布不均且包含了冗余点云和噪声。为此有必要对其进行预处理，在降噪的同时减少算力消耗。首先采用区域增长法对离群点进行剔除，接着采用体素滤波算法进行二次处理。图 8 展示了点云预处理结果。



(a) 原始点云

(b) 滤波结果

图 8 点云预处理结果

为获得混凝土道面侧边和上表面的分界线，需要对地平面和混凝土表面进行滤除，RANSCA 算法是一种常见的点云平面提取算法<sup>[3]</sup>，但提取效果与种子点选取的随机性有较大相干性<sup>[4]</sup>。为此，本文提出了一种优化算法，具体步骤如下：

**Step1:** 将激光雷达坐标系下的点云转换至大地坐标系，并设置高度阈值对原始点云  $P$  进行直通滤波，即寻找离地一定高度范围内的点云作为种子点点集  $P'$ 。

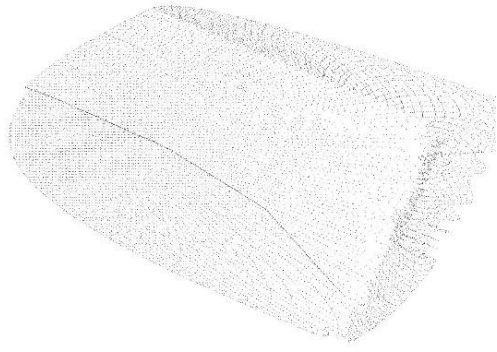
**Step2:** 假定待拟合的平面方程为： $z = Ax + By + Cz$ ，随机选取  $P'$  内的三点确定空间平面  $S$  的表达式，求解线性方程组即可得到平面的参数  $A$ 、 $B$  与  $C$ 。

**Step3:** 遍历处种子点外的所有点，按照如下公式计算点到平面的距离并求和，作为该平面的投票得分。

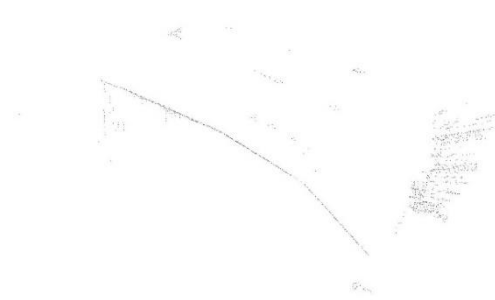
$$d = \frac{|Ax_i + By_i + C - z_i|}{\sqrt{A^2 + B^2 + 1}} \leq \varepsilon \quad (1)$$

**Step4:** 重复上述步骤  $K$  次，或直到拟合平面临近区域内的点数量超过阈值。对所有结果排序，并选出得分最高和次高的平面  $S_{r1}$  和  $S_{r2}$  作为提取的平面结果。

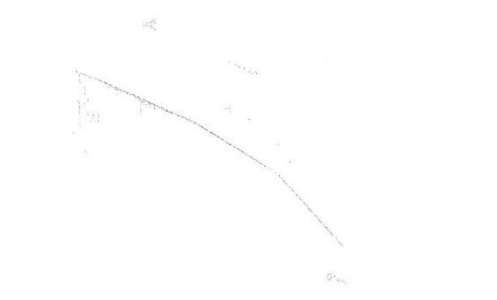
接着将滤除平面后的点集投影至  $XoY$  平面内并剔除离群点，采用 RANSAC 拟合算法对二维点集进行拟合，即可获得代表道面边界的曲线表达式。图 9 为两种拟合算法的对比结果。可以看到，基于 RANSAC 的拟合算法在包含异常点时，相较于最小二乘拟合算法，可以更为精确地拟合出实际轨迹。



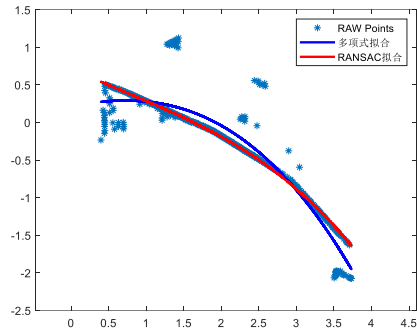
(a) 体素滤波结果



(b) 平面滤除结果



(c) 离群点剔除结果



(d) 不同拟合算法比较

图 9 点云道面边界检测结果

## 2.4 多传感器数据融合与参考路径提取

为了将来自激光雷达和相机的不同轨迹表达式进行融合,以获得更为道面边界轨迹方程,需要引入数据融合算法。假定激光雷达检测到的道面边界点集合  $E_l = \{(x_{li}, y_{li}) | i \in [1, N_l]\}$ , 可见光相机检测出的道面边界点集合  $E_c = \{(x_{ci}, y_{ci}) | i \in [1, N_c]\}$ , 利用三次多项式来描述道面边界的曲线方程。

分别对  $E_l$  和  $E_c$  进行多项式拟合,可以得到两组不同的系数。根据卡尔曼滤波器的原理,可以将两组系数看作两个不同的观测,并采对其进行融合,同时更新一组模型参数,从而得到更准确的状态估计值。卡尔曼滤波器的状态方程如下:

$$X_t = AX_{t-1} + BU_{t-1} + w_t \quad (2)$$

式中,  $A$  为系统状态转移矩阵,  $X_t$  代表状态量,  $B$  为控制输入矩阵,  $U_{t-1}$  为控制量,  $w_t$  为系统噪声。系统观测方程可以表示为:

$$Z_t = Hx_t + v_t \quad (3)$$



式中， $Z_t$  为系统观测量， $H$  为系统状态量的雅克比矩阵， $v_t$  为观测噪声。假设  $w_t$  和  $v_t$  互相独立且均服从正态高斯分布，其协方差矩阵分别为  $Q_t$  和  $R_t$ ，定义  $P_t$  表示系统预测协方差矩阵，那么可以获得系统状态和协方差更新方程如下：

$$\hat{X}_t^- = A\hat{X}_{t-1} + BU_{t-1} \quad (4)$$

$$P_t^- = AP_{t-1} - A^T + Q \quad (5)$$

同样的，得到卡尔曼增益  $K_t$  的计算方程，并根据计算出的卡尔曼增益，得到当前时刻的最优估计值  $\hat{X}_t$ ，以及系统协方差更新方程如下：

$$K_t = P_t^- H^T (HP_t^- H^T + R)^{-1} \quad (6)$$

$$\hat{X}_t = \hat{X}_t^- + K_t(Z_t - H\hat{X}_t^-) \quad (7)$$

$$P_t = (I - K_t H)P_t^- \quad (8)$$

在预测阶段，首先根据上一时刻的状态量、协方差矩阵、状态转移矩阵和过程噪声协方差矩阵，对状态向量和协方差矩阵进行预测。接下来，在更新阶段，根据当前时刻的观测值和观测矩阵，计算卡尔曼增益、更新状态向量估计值和协方差估计值。通过根据预测和更新公式进行迭代，持续优化直至滤波器收敛。经过多次迭代之后，状态量将成为道面边界曲线轨迹方程系数的最优估计值。

### 3 轨迹规划模块设计

#### 3.1 布放轨迹规划

摊铺机在前往施工初始位置时，需要由人工控制进行转场，这一过程被称为布放，如图 10 所示。采用人工控制的方式无法实现摊铺机与初始施工位置的精确重合，影响摊铺精度。因此，有必要开发一种自动化的系统，实现自动布放。

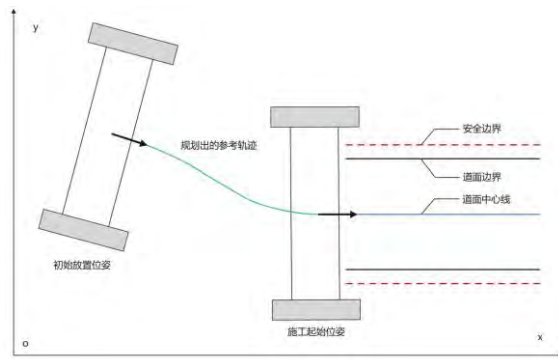


图 10 布放示意图

考虑到摊铺机初始位置与姿态与目标位姿间的偏差较小，布放轨迹规划问题

可以等效为：已知轨迹起点  $P_s(p_s, v_s, \varphi_s)$  与轨迹终点  $P_e(p_e, v_e, \varphi_e)$  的位置、速度、航向角的条件下，寻找一条平滑曲线的问题。为了减少速度、加速度突变对摊铺机行走机构带来的交变载荷与冲击载荷，选用轨迹曲率、速度和加速度变化平滑的 5 次多项式作为轨迹曲线模型。以起点的位置、速度和加速度边界条件为例，可以构造出如下 3 个方程

$$\begin{cases} f(t_0) = a_0 + a_1 t_0 + a_2 t_0^2 + \dots + a_5 t_0^5 \\ f'(t_0) = a_1 + 2a_2 t_0 + 3a_3 t_0^2 + 4a_4 t_0^3 + 5a_5 t_0^4 \\ f''(t_0) = 2a_2 + 6a_3 t_0 + 12a_4 t_0^2 + 20a_5 t_0^3 \end{cases} \quad (9)$$

利用终点约束条件可再构造 3 个方程，求解这一线性方程组，即可得到多项式轨迹的 6 个系数，从而规划出一条连续且平滑的布放轨迹。

### 3.2 行驶轨迹规划

行驶轨迹规划问题可以简化为寻找一条平滑曲线，以尽可能与给定航路点重合，并满足起点和终点位姿的边界约束。为了避免高阶多项式拟合带来的龙格现象，采用样条差值法进行轨迹规划，将轨迹分为  $k$  段，对每段路径进行多项式轨迹规划，如图 11 所示。

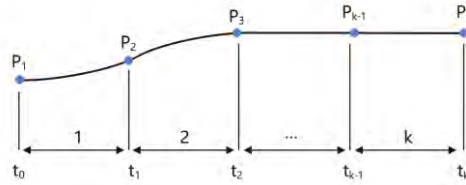


图 11 样条曲线差值法示意图

构造目标函数为最小化冲击度 (jerk)，设摊铺机的轨迹为  $s = f(t)$ ，那么轨迹规划问题可以转化为在  $[0, T]$  时域内，寻找一条使得冲击度最小的多项式轨迹  $f(t)$  的问题。经过航路点且满足连续性约束的理想轨迹有无数条，为了在保证轨迹平滑性和无碰撞的条件下实现最优冲击度，可以将寻找可行轨迹的问题转化为带约束条件的最优化问题：

$$\begin{cases} \min_{p, \delta t} J(\delta t) = p^T Q p \\ s.t. \quad A_{eq} p = b_{eq} \\ \quad \quad A_{ineq} p \leq b_{ineq} \end{cases} \quad (10)$$

构建目标函数  $J(\delta t)$  如下：



图 13 展示了部分代表性工况下的道面边界检测结果。对比深度分割检测算法采用逐像素按通道维度检测的方案,本文提出的算法基于行方向上网格化后的水平锚框进行道面边界区域初步筛选,通过数据降维的手段,在降低运算量的同时,扩展了感兴趣锚框的感受野大小,使得检测效果和鲁棒性有了一定程度的提升。此外,对于每个行锚框,采用传统图像检测的方式,可以更为精确地检测出道面边界的实际位置,为摊铺机的参考轨迹精确提取提供了保障。

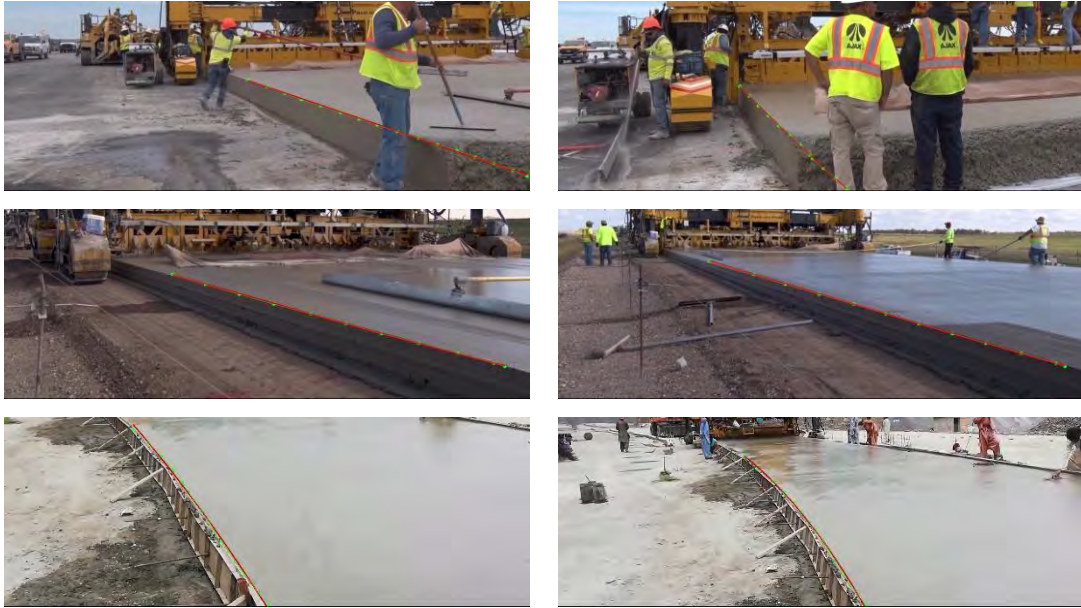
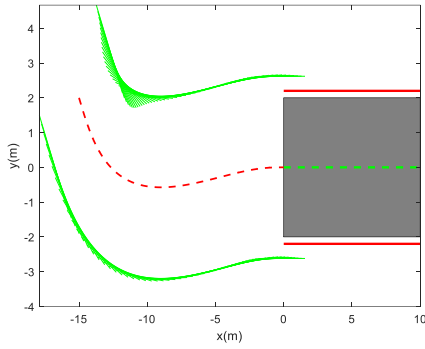


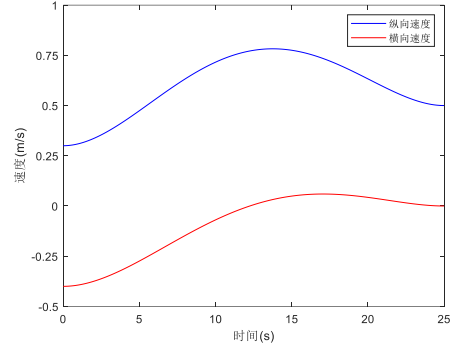
图 13 部分工况下的道面边界检测结果

## 4.2 布放轨迹规划模块仿真

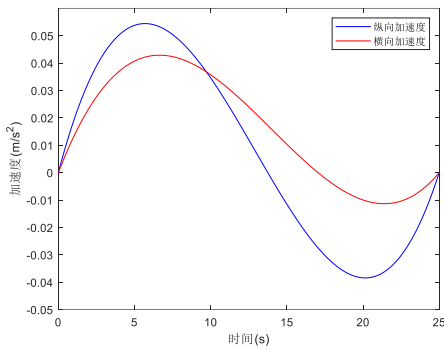
为了验证布放轨迹规划算法的有效性,在 Matlab 中搭建仿真环境模拟摊铺布放轨迹规划的过程。坐标系原点位于铺筑体起点几何中心位置,正方向为道面切线方向。摊铺机初始坐标位于 $[-15, -2.25]$ 处,起点与终点速度均为 $0.5m/s$ ,安全边界距离 $0.2m$ 。设置仿真时间 $25s$ ,步长 $50ms$ ,所规划出的轨迹如图 14 所示,图中绿色部分为履带内侧扫过区域,可以看到其在安全边界(图中红色实线)外,且不与待施工道面区域(图中灰色部分)发生碰撞。且轨迹、速度、加速度与冲击度均连续,且在容许范围内,满足实际施工要求。



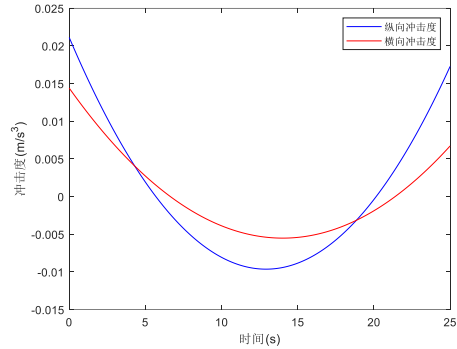
(a) 规划出的布放轨迹



(b) 速度随时间变化曲线



(c) 加速度随时间变化曲线

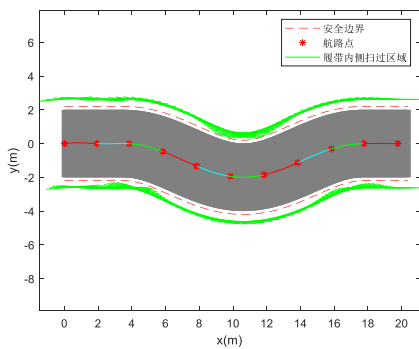


(d) 冲击度随时间变化曲线

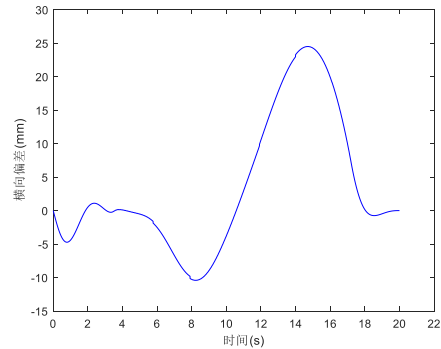
图 14 摊铺机布放工况规划轨迹

### 4.3 行驶轨迹规划模块仿真

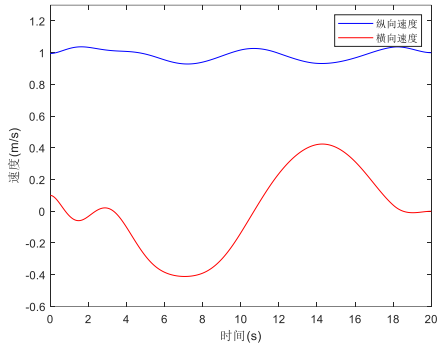
为了验证行驶过程中轨迹规划算法的有效性,针对高速大曲率工况进行轨迹规划仿真验证。设定摊铺机初始位置于坐标原点,初始航向角 $7.5^\circ$ ,初始与终止速度均为 $1m/s$ 。设置仿真时间 $20s$ ,步长 $50ms$ ,所规划出的轨迹如图 15 所示。轨迹与道面真实中心的最大横向偏差为 $24.53mm$ ;加速度连续且平滑,最大加速度为 $0.19m/s^2$ ,满足加速度约束条件;冲击度连续且最大冲击度 $0.59m/s^3$ 小于安全阈值;轨迹最大曲率为 $0.19m^{-1}$ ,对应最小转向半径为 $5.26m$ ,可见该轨迹在满足安全约束的同时,加速度、冲击度与曲率均在容许范围内,满足施工要求。



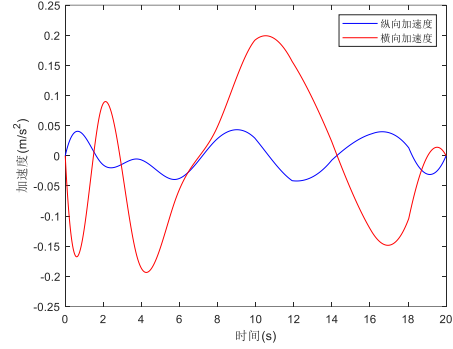
(a) 规划出的行驶轨迹



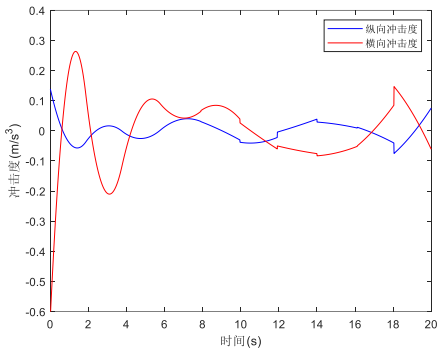
(b) 轨迹横向偏差



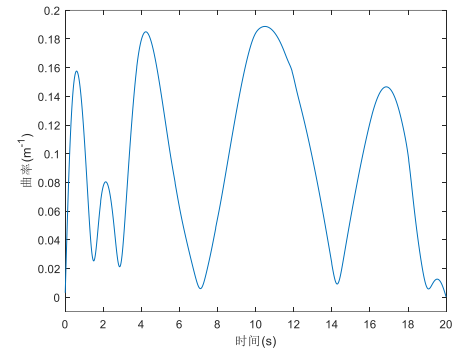
(c) 速度随时间变化曲线



(d) 加速度随时间变化曲线



(e) 冲击度随时间变化曲线



(f) 曲率绝对值随时间变化曲线

图 15 高速大曲率工况下摊铺机行驶规划轨迹

## 5 结束语

本文针对机场混凝土跑道的自动化施工问题进行研究,分别就环境感知系统和轨迹规划系统进行了设计。在环境感知方面,提出了一种基于激光雷达和可见光相机的道面边界检测和数据融合方案,实现了高效而精确的道面边界检测。在轨迹规划方面,针对布料轨迹规划和行驶轨迹规划工况,提出了基于最小化冲击度的多项式轨迹规划方法,可以生成并优化布料轨迹,确保摊铺机的安全行驶和施工质量。仿真与实验结果表明:系统能够在复杂多变的施工环境中准确检测出道面边界;轨迹规划算法在不同工况下具有较好的泛化性,各项指标均满足实际施工需要。对提升机场混凝土摊铺施工效率具有重要意义。

---

**作者简介：**吴霄峰（1998-），男，江苏苏州人，硕士研究生，研究方向为：汽车工程及其智能化。

**通讯作者：**熊树生（1971-），男，福建周宁县人，工学博士，研究员，博士生导师，研究方向为：机器换人及物联网相关研发、清洁能源与新能源车船优化设计及控制、新能源汽车热管理系统、生物质的资源化利用。

## 参考文献

[1] 宋端英.滑模摊铺机在机场场道及站坪工程中的应用实践[J].中国设备工程,2020(04):211-212.

[2] Qin Z, Wang H, Li X. Ultra fast structure-aware deep lane detection[C]. Computer Vision—ECCV 2020: 16th European Conference, Glasgow, UK, August 23–28, 2020, Proceedings, Part XXIV 16. Springer International Publishing, 2020: 276-291.

[3] Markovic V, Jakovljevic Z, Budak I. Automatic recognition of cylinders and planes from unstructured point clouds[J]. The Visual Computer, 2021: 1-24.

[4] Fotsing C, Menadjou N, Bobda C. Iterative closest point for accurate plane detection in unorganized point clouds[J]. Automation in Construction, 2021, 125: 103610.