

考虑车辆-地形耦合的非结构地形 多层语义地图

刘前结^{1,2}, 郭志荣^{1,2}, 刘 珺³, 祝青园³, 胡国良^{1,2}, 丁孺琦^{1,2}, 李 刚^{1,2}

(1. 华东交通大学 交通智能运维技术与装备教育部重点实验室, 南昌 330013; 2. 华东交通大学 南昌市车辆智能装备与控制重点实验室, 南昌 330013; 3. 厦门大学 萨本栋微米纳米科学技术研究院, 福建 厦门 361102)

摘要: 为了保障复杂非结构地形下无人工程车辆的准确运动控制及安全作业, 构建了考虑安全行驶信息的非结构地形高精度语义地图。首先, 通过无人机倾斜摄影获得非结构地形点云, 利用滤波去噪与空洞补全获得连续完整的地形点云模型。然后, 通过 Sobel-G 算子计算得到数字梯度模型, 随后建立车辆-地形耦合模型获取车辆实际行驶侧倾状态, 根据不同的扩展稳态余量角设计了一种新颖的区域行驶安全等级语义分割方法。最终, 构建了包含地形点云模型、数字高程模型、二维 RGB 模型、数字梯度模型、风险障碍语义信息、区域安全等级语义信息的非结构地形多层语义地图。在非结构地形环境中进行了实验验证, 通过地形测绘与语义分割验证了语义地图的有效性, 结果表明风险障碍语义分割的交并比达到 81%, 基于车辆-地形耦合模型的扩展稳态余量角准确表征了工程车辆的失稳运动状态, 能够有效实现区域行驶安全等级的语义分割。本文提出的多层语义地图扩展了非结构地形的语义信息维度, 为无人工程车辆的导航控制和作业规划提供了更多决策先验信息, 从而提高智能化自主施工的作业效率。

关键词: 工程车辆; 非结构地形; 行驶安全性; 地图构建

中图分类号: U463.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5497(2026)05-1278-10

DOI: 10.13229/j.cnki.jdxbgxb.20241062

Novel multi-layer semantic map of unstructured terrain environment considering vehicle-terrain coupling model

LIU Qian-jie^{1,2}, GUO Zhi-rong^{1,2}, LIU Jun³, ZHU Qing-yuan³, HU Guo-liang^{1,2},
DING Ru-qi^{1,2}, LI Gang^{1,2}

(1. Key Laboratory of Transportation Intelligent Operation and Maintenance Technology and Equipment, Ministry of Education, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China; 2. Key Laboratory of Vehicle Intelligent Equipment and Control of Nanchang City, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China; 3. Pen-Tung Sah Institute of Micro-Nano Science and Technology, Xiamen University, Xiamen 361102, China)

收稿日期: 2024-10-07.

基金项目: 国家自然科学基金项目(52405104); 江西省自然科学基金项目(20242BAB20249, 20232BAB204041); 江西省交通运输厅科技项目(2025QN003).

作者简介: 刘前结(1993-), 男, 副教授, 博士. 研究方向: 自动驾驶车辆决策规划及运动控制.

E-mail: qjliu@ecjtu.edu.cn

通信作者: 李刚(1978-), 男, 教授, 博士. 研究方向: 新能源与智能汽车电控技术. E-mail: ligang0794@ecjtu.edu.cn

Abstract: To ensure accurate motion control and safe operation of unmanned engineering vehicles in complex terrain, the construction of high-precision semantic map is one of the key tasks. Firstly, the unstructured terrain scanning was performed by UAV tilt photography, and a continuous terrain point cloud model was obtained by implementing the filter denoising and hole completion. Then, a Sobel-G operator was introduced to establish the digital gradient model, and combined with actual vehicle driving state in vehicle-terrain dynamic model, the key safety-assured semantic information was further extracted. Finally, a multi-layer map is constructed, which including terrain point cloud model, digital elevation model, 2D RGB model, digital gradient model, risk obstacle and driving safety semantic informations. Experimental verification is conducted in an unstructured terrain environment, and the effectiveness of semantic map is validated through terrain mapping and semantic segmentation. The experimental results show that the intersection over union of risk obstacle semantic segmentation reaches 81%. The extended steady-state margin angle based on the vehicle-terrain coupling model accurately characterizes the unstable motion state of engineering vehicles and can effectively achieve the semantic segmentation of regional driving safety levels. This work further enriches the semantic information layer of unstructured terrain and provides more decision-making basis for the autonomous driving of unmanned engineering vehicles, which improves the operating efficiency of autonomous construction.

Key words: engineering vehicle; unstructured terrain; driving safety; map construction

0 引言

无人工程车辆在矿山开采、农田作业以及野外抢险救灾等非结构地形环境下展现出巨大的应用潜力,高精度地图是无人驾驶系统的基本功能,它不仅依赖于高分辨率的地形数据,还要求具备实时准确的语义信息,以确保无人驾驶车辆能够安全有效地进行作业规划^[1]。

非结构地形环境的高精地图建模方法主要有在线实时扫描与离线测绘建模等^[2]。其中,SLAM(Simultaneous localization and mapping)技术是在线实时扫描最常用的地图建模方法,广泛应用于移动机器人的实时路径规划,采用的传感器通常包含激光雷达与视觉相机^[3]。为了实现轻量化的SLAM系统,Yi等^[4]采用无人机搭载激光雷达进行里程计实时建图任务,有效提高了建图精度及效率。Zhang等^[5]使用2D激光雷达构建了室内机器人的SLAM系统,实现了高效的路径规划决策任务。视觉相机建模技术虽然在精度上不及激光雷达所提供的点云模型,但其低能耗和轻便性使其在小型机器人系统中得到成熟应用。Matthies等^[6,7]对双目视觉在火星探测车中的应用进行了系统阐述,视觉地形建模为探测车在着陆和巡航过程中提供了准确的路径规划与导航控制信息。此外,双目视觉技术已成为野外机器人实时扫描及建图的主流技术方案之一。Ma等^[8]

通过融合双目视觉与惯性测量单元数据,成功实现了机器狗在复杂野外环境中的自主导航操作。Sock等^[9]使用3D激光雷达和相机在线构建了栅格地图,估计了非结构地形的可通行性,结果表明结合激光雷达和相机能够提供更多互补信息。

非结构地形环境的地形测绘建模方法能够获得更高的地图建模精度,主要方法包括传统的人工测绘、激光雷达测绘与无人机摄影测绘等。人工测绘主要依赖于高精度的GPS定位系统与测距仪等专业设备,通过人工方式测量控制点数据,适用于对精度要求极高且地形结构相对简单的场景^[10]。激光雷达测绘则利用车辆或无人机作为移动平台,通过连续扫描和数据配准,能够实现地形高精度点云建模,已在城市自动驾驶中得到广泛应用^[11]。倾斜摄影测绘通过无人机搭载摄像头沿预定航线进行多角度拍摄图片,结合相机位姿和内参,利用关键点匹配和三角测量技术生成地图模型^[12,13]。该方法不仅能够达到厘米级建模精度,还具有成本效益高、建模速度快和精度高等优势。为了测量森林碳储量变化,Hu等^[14]利用无人机倾斜摄影获取森林的多视角遥感影像,实现单棵树的点云提取分割。Chen等^[15]利用无人机进行大尺度非结构地形测绘,基于特征检测及图像匹配优先点云构建,验证了该方法可实现厘米级非结构地形地图构建。

在非结构地形环境中(如矿山挖运场景),工程车辆在执行作业任务时的行驶速度较低,主要是因为地形的不规则性可能引发车辆失稳侧翻。大多工程车辆的质心位置较高,造成驾驶员视野受限,对地形的可通行性评估不准时增加了车辆侧翻的风险^[16,17]。通过建立车辆-地形耦合模型,能够更为精准地预测车辆的行驶姿态信息,获取工程车辆的风险预警状态。然而,这种耦合模型仅判断了车辆稳定安全性,未结合地图进行导航预警,实时计算存在较大的时滞性,无法提供充足的车辆控制决策及反馈响应时间。为此,通过对非结构地形的点云数据进行安全预警状态划分,并将这些预警状态作为语义信息整合到地形测绘后的高精度地图中,可直接提前为车辆提供区域行驶安全信息及控制响应反馈,在保证安全的前提下优化了无人驾驶工程车辆的作业性能。

目前,非结构地形语义分割主要实现凹坑、凸起等障碍物的区分标记,缺乏表征车辆-地形耦合关系的行驶安全语义信息^[18]。为此,本文基于地形测绘建模方法,提出了考虑车辆-地形耦合的非结构地形多层语义地图,主要包含地形点云模型、数字高程模型、二维 RGB 模型、数字梯度模型、风险障碍语义、区域安全等级语义信息 6 个地图信息层,为无人工程车辆提供准确丰富的环境先验信息,对矿山等非结构地形高效安全作业具有重要意义。

1 非结构地形构建

1.1 无人机倾斜摄影地形建模

地形点云模型为地图建模提供基础数据源,能够生成后续的数字地图层及语义信息层。考虑到车载传感器在非结构地形环境中可能受到地形和尘埃等因素的影响,本文采用无人机倾斜摄影方法获取非结构地形的大规模建图点云数据。为了获取多视角的测绘图像,倾斜摄影的采集航线为 1+4 模式:即 1 个正上方航线,4 个东、南、西、北方向的倾斜航线。飞行路线为 Z 字形路径,且飞行高度保持一致。这种航线规划方法有助于从多个角度捕捉地形特征,为生成高精度地图提供丰富数据信息。

在天气与光照良好情况下,选择约 1 000 平方米的非结构地形区域作为测绘实验场景,通过自适应增强算法对航拍图像进行预处理。然后,对拍摄图像进行特征提取和匹配,并通过 Pix4Dap-

per 生成大规模初始测绘点云。进一步,通过几何空间与色彩空间统计滤波对点云的异常噪声点和无效杂草点进行滤波^[15,19],并采用网格区域生长方法,通过在高程模型轮廓面的多次插值生长迭代,实现地形点云空洞的补全。最后,使用优化的重建点云来实现地形点云模型快速构建,非结构地形构建方案如下图 1 所示。

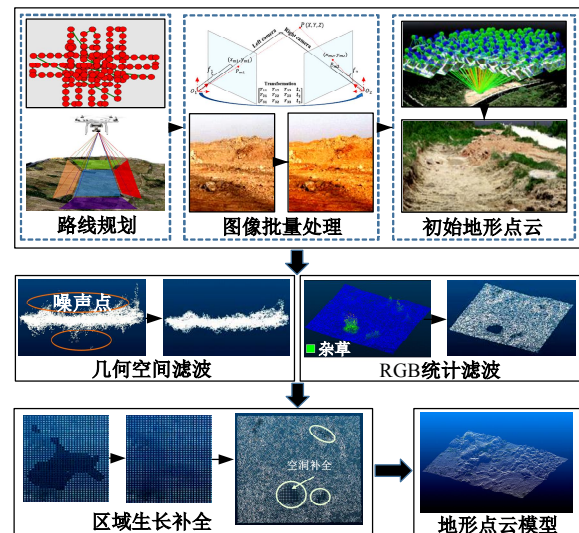


图 1 非结构地形构建方案

Fig. 1 Construction scheme for unstructured terrain

1.2 多层地图索引构建

获得数字地形模型数据后,通过二维函数的有序离散集合来索引多层地图模型^[20],该函数可以由下式给出:

$$k_p = f_n(x, y), n = 0, 1, \dots, p = 0, 1, \dots \quad (1)$$

式中: x, y 为地形模型数据的横、纵坐标; f_n 为地图层的索引函数; k_p 为通过索引函数获取的地图层。

当索引对象为高程值时,即为数字高程模型。通过非结构地形的二维栅格数据获得,其中包含 X/Y/Z 轴的几何空间坐标。通过相近邻域点云的栅格体素化均值处理得到高程值,具体过程如下式:

$$f_1(x, y) = \frac{\sum_{i=1}^N z_i}{N},$$

$$\{(x_i, y_i, z_i) \mid |x_i - x| < 0.5d, |y_i - y| < 0.5d\} \quad (2)$$

式中: N 为邻域点云的总点数; d 为栅格化边长,即模型分辨率; (x_i, y_i, z_i) 为 (x, y, z) 附近的邻域点。

为了进一步捕获 RGB 地图信息,通过点云正

射影像投影可获得二维 RGB 模型,包含索引坐标 X/Y 与色彩空间坐标 R/G/B 五个数据维度,相应的 RGB 参数被投影为:

$$f_2(x, y) = \left(\frac{\sum_{i=1}^N R_i}{N}, \frac{\sum_{i=1}^N G_i}{N}, \frac{\sum_{i=1}^N B_i}{N} \right),$$

$$\{(x_i, y_i, R, G, B) \mid |x_i - x| < 0.5d, |y_i - y| < 0.5d\}$$

(3)

通过栅格化映射构建得到数字高程模型(4 cm 分辨率)与二维 RGB 模型(2 cm 分辨率)如图 2 所示,与原始非结构地形点云模型相比,大大压缩了数据量,提高了语义分割算法效率。数字高程模型是实现非结构地形障碍语义与行驶安全语义分割的前提,二维 RGB 模型能够为定位提供地图匹配信息。

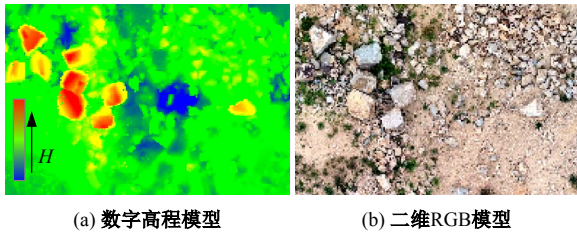


图 2 基于地形点云构建的格式化模型

Fig. 2 Format model based on terrain point cloud

2 考虑车辆-地形耦合的安全语义

通过构建车辆-地形耦合模型计算工程车辆的侧翻稳定性指标,实现行驶安全语义分割,为工程车辆无人作业提供安全行驶信息。构建的非结构地形高精度地图包括两类语义信息:①基于数字梯度模型的风险障碍语义信息;②基于车辆-地形耦合模型的行驶安全等级语义信息。考虑车辆-地形耦合的安全语义分割技术路线如图 3 所示。

2.1 数字梯度模型

数字高程模型的离散梯度可以表示为:

$$\nabla f = \begin{bmatrix} g_x \\ g_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f}{\partial x} & \frac{\partial f}{\partial y} \end{bmatrix}^T =$$

$$\left[\frac{f(x+1, y) - f(x, y)}{4l} + \frac{f(x, y+1) - f(x, y-1)}{8l}, \frac{f(x, y+1) - f(x, y-1)}{8l} + \frac{f(x+1, y) - f(x-1, y)}{8l} \right]^T$$

(4)

相对梯度可以通过计算 Sobel 算子获得,该算子通常用于图像边缘检测和分割^[21]。为了近似求解绝对梯度,设计了一个 Sobel-G 算子建立数字梯度模型,其运算矩阵描述为:

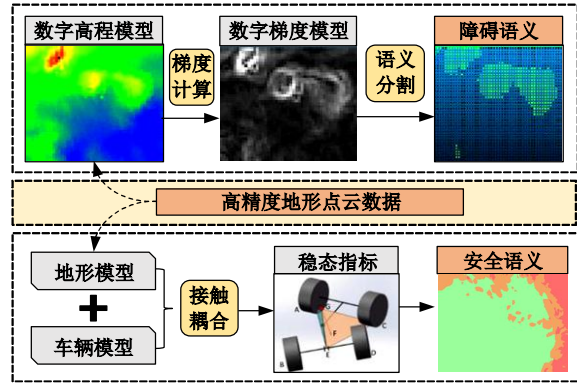


图 3 考虑车辆-地形耦合的安全语义分割

Fig. 3 Safety semantic segmentation considering vehicle-terrain coupling model

$$g_x = \frac{f(x+1, y)}{4l} + \frac{f(x+1, y+1) + f(x+1, y-1)}{8l} - \frac{f(x-1, y)}{4l} - \frac{f(x-1, y+1) + f(x-1, y-1)}{8l}$$

(5)

$$g_y = \frac{f(x, y+1)}{4l} + \frac{f(x-1, y+1) + f(x+1, y+1)}{8l} - \frac{f(x, y-1)}{4l} - \frac{f(x-1, y-1) + f(x+1, y-1)}{8l}$$

(6)

式中: l 为算子栅格的边长。

通过计算数字高程模型的梯度,应用 Sobel-G 算子建立数字梯度模型。灰度化后的数字梯度模型如图 4 所示,图中可以明显观测到地形障碍物的轮廓区域,地形障碍物边界能够被有效分割。

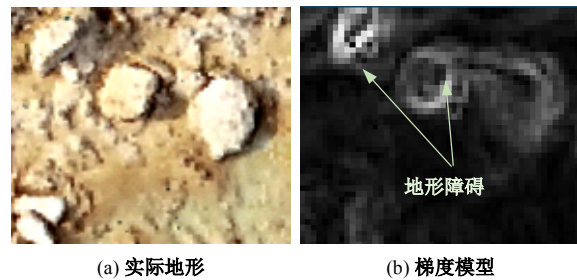


图 4 数字梯度模型

Fig. 4 Digital gradient model

2.2 风险障碍语义分割

为了在地形障碍物中区分风险障碍物,需进一步考虑工程车辆的侧翻稳定特性。本文以铰接

式工程车辆作为非结构地形作业研究对象,其具有变结构、变质心和变载荷的特点。为了建立工

程车辆的运动学模型,选择转向铰接点作为车辆坐标原点,如图 5 所示。

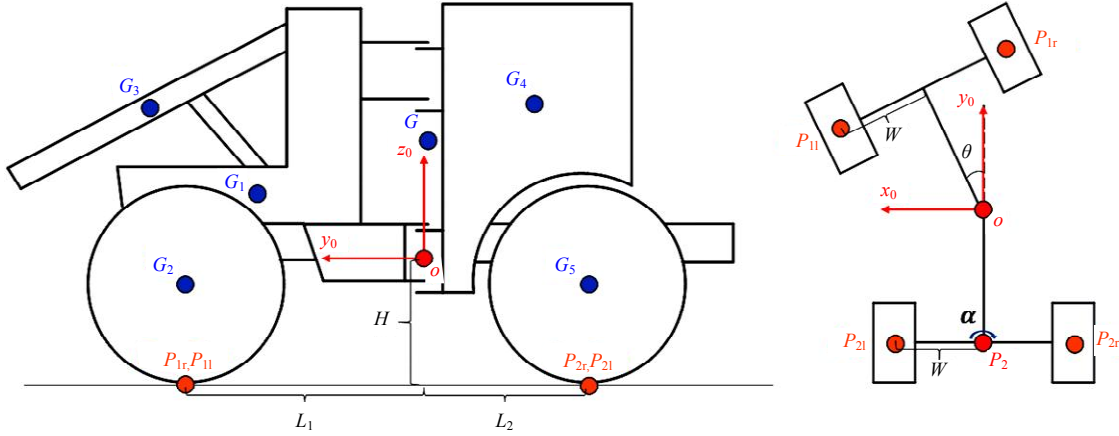


图 5 铰接工程车辆坐标系

Fig. 5 Coordinate system of articulated engineering vehicle

整车质量主要包括前车身质量 G_1 、前轮质量 G_2 、前摆臂质量 G_3 、后车身质量 G_4 和后轮质量 G_5 。因此,车辆的重心 $G(x_0, y_0, z_0)$ 为:

$$G = \frac{\sum_{n=1}^5 M_n G_n}{\sum_{n=1}^5 M_n} \quad (7)$$

式中: M_n 为每个车体部分的质量; G_n 为每个车体部分的坐标。

为了获得轮胎接地点,通过几何运动关系分别获得左前轮 $P_{1l}(x_{1l}, y_{1l}, z_{1l})$ 、右前轮 $P_{1r}(x_{1r}, y_{1r}, z_{1r})$ 、左后轮 $P_{2l}(x_{2l}, y_{2l}, z_{2l})$ 和右后轮 $P_{2r}(x_{2r}, y_{2r}, z_{2r})$ 的接地坐标为:

$$\begin{cases} P_{1l}^T = R_1(W, L_1, -H)^T \\ P_{1r}^T = R_1(-W, L_1, -H)^T \end{cases} \quad (8)$$

$$\begin{cases} P_{2l}^T = R_2(W, -L_2, -H)^T \\ P_{2r}^T = R_2(-W, -L_2, -H)^T \end{cases} \quad (9)$$

$$R_1 = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & 0 \\ \sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, R_2 = \begin{bmatrix} \cos\alpha & 0 & \sin\alpha \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\alpha & 0 & \cos\alpha \end{bmatrix} \quad (10)$$

式中: W 为 1/2 轮距宽度; L_1 为从前轴到重心的距离; L_2 为从后轴到重心的距离; H 为转向铰接点的高度; θ 为铰接转向角; α 为后桥摆动角度。

工程车辆样机的主要参数见表 1。

为了考虑障碍物高度对车辆通行能力的影响,通过计算车辆越过障碍物时的侧倾角阈值,剔除不影响工程车辆行驶稳定性的无效障碍物。为此,定义一个临界高度阈值,以判断数字高程模型获得的

表 1 工程车辆样机主要参数

Table 1 Main parameters of engineering vehicle prototype

参数	数值	参数	数值
L_1/m	0.48	L_2/m	0.48
H/m	0.23	W/m	0.32
M_1/kg	23.6	G_1/m	(0, 0.32, 0.08)
M_3/kg	2.6	G_3/m	(0, 0.23, 0.21)
M_4/kg	31.9	G_4/m	(0, -0.24, 0.20)
$(M_2/M_5)/kg$	16.8	$(G_2/G_5)/m$	(0, ±0.48, -0.03)

风险障碍物高度是否会造成工程车辆侧翻。铰接式工程车辆的静态侧翻过程如图 6 所示。

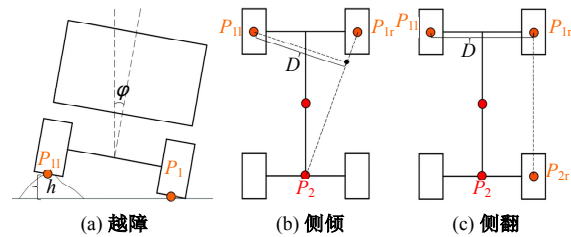


图 6 铰接工程车辆的静态侧翻过程

Fig. 6 Static rollover process of articulated engineering vehicle

当左前车轮在障碍物上行驶时,车轮将被抬高造成的侧倾角小于后摆动桥的最大约束角时,车身将围绕 P_{1r}, P_2 轴发生侧倾(见图 6(a)(b))。低速时产生的侧倾角 φ 可以定义为:

$$\varphi = \arcsin(h/D), D = 2W \frac{L_1 + L_2}{\sqrt{W^2 + (L_1 + L_2)^2}} \quad (11)$$

式中: h 为障碍物高度; D 为从点 P_{1l} 到 P_{1r}, P_2 轴的投

影距离。

当侧倾角超过后摆动桥的最大约束角时,车身将围绕 $P_{1r}P_{2r}$ 轴达到侧翻临界状态(见图 6(c)),此时 $D=2W$ 。车辆依次经过这两种侧倾运动后将发生侧翻风险,极限侧翻角可以通过车辆几何参数计算获得。取一个合适的安全系数 δ ,可以推导出临界障碍物高度 h_0 为:

$$h_0 = (2W \sin \varphi_{\max}) / \delta \quad (12)$$

通过计算工程车辆样机的极限侧翻角,获得可通过地形的临界障碍物高度,基于此实现在高程模型中滤除低速行驶时的无效地形障碍物,并在地形测绘中进一步标注区分风险障碍物。在密集障碍物场景下,风险障碍物的语义信息分割如图 7 所示,通过对无效障碍语义进行滤除,有效扩大了车辆的可通行区域。

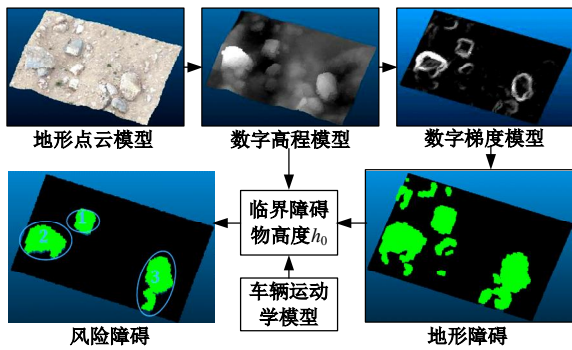


图 7 风险障碍物的语义信息分割

Fig. 7 Semantic segmentation of risk obstacle

2.3 区域安全等级语义分割

复杂非结构地形中的行驶安全应进一步考虑车辆与地形之间的动态运动关系。结合图 6 的车辆侧倾运动状态,通过计算车辆质量合力向量与稳定面法向量的夹角,稳态余量角(Steady-state margin angle, SSMA)能够有效表征铰接式工程车辆的动态侧翻稳定性^[22]。由于 SSMA 中没有考虑动态俯仰侧倾,为此引入俯仰稳定面,提出一种改进的扩展 SSMA,如图 8 所示。

如图 8(a)所示,当车辆处于稳定状态时,合

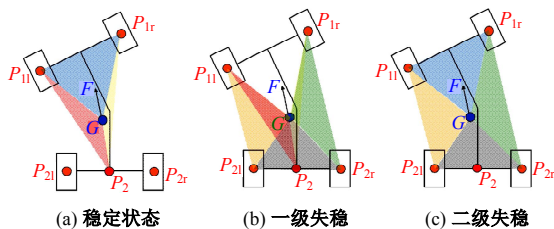


图 8 扩展稳态余量角

Fig. 8 Extended steady-state margin angle

力 F 位于由平面 $\Delta GP_{1l}P_{1r}$ 、 $\Delta GP_{1l}P_{2l}$ 和 $\Delta GP_{1r}P_{2r}$ 包络的稳定区间内。如图 8(b)所示,当合力 F 位于由平面 $\Delta GP_{1l}P_{2l}$ 、 $\Delta GP_{1r}P_{2l}$ 、 $\Delta GP_{1l}P_{2r}$ 、 $\Delta GP_{1r}P_{2r}$ 和 $\Delta GP_{2l}P_{2r}$ 组成的侧倾区间内时,车辆将围绕横向侧倾轴作侧倾运动,此时处于一级失稳状态。如图 8(c)所示,如果合力 F 超出由平面 $\Delta GP_{1l}P_{1r}$ 、 $\Delta GP_{1l}P_{2l}$ 、 $\Delta GP_{2l}P_{2r}$ 和 $\Delta GP_{1r}P_{2r}$ 组成的最大侧倾区间时,车辆将进入二级失稳状态,最终发生侧翻。

为了获得扩展 SSMA,需要计算各平面法向量,一级失稳平面的相应法向量 $\vec{n}_1 = \{\vec{n}_{\Delta GP_{1l}P_{2l}}, \vec{n}_{\Delta GP_{1r}P_{2l}}\}$ 可通过下式计算:

$$\vec{n}_{\Delta GP_{1l}P_{2l}} = \overrightarrow{GP_{1l}} \times \overrightarrow{GP_{2l}}, \vec{n}_{\Delta GP_{1r}P_{2l}} = \overrightarrow{GP_{1r}} \times \overrightarrow{GP_{2l}} \quad (13)$$

二级失稳平面的法向量可通过类似方法计算,合力 F 则可通过车辆重力和横向加速度计算,可以表示为:

$$\vec{F} = M(\vec{g} + \vec{a}_y) \quad (14)$$

综合上式,扩展 SSMA 可表示为:

$$\begin{cases} \psi_1 = \max \left(\arccos \left(\frac{\vec{F} \cdot \vec{n}_1}{|\vec{F}| |\vec{n}_1|} \right) \right) - \frac{\pi}{2} \\ \psi_2 = \max \left(\arccos \left(\frac{\vec{F} \cdot \vec{n}_2}{|\vec{F}| |\vec{n}_2|} \right) \right) - \frac{\pi}{2} \end{cases} \quad (15)$$

式中: ψ_1 为一级稳态余量角,是合力矢量与一级失稳平面之间的最小夹角; ψ_2 为二级稳态余量角,是合力矢量和二级失稳平面之间的最小夹角。

基于扩展 SSMA,铰接工程车辆的行驶状态可分为三类:① $\psi_1 < 0, \psi_2 < 0$ 时为稳定状态;② $\psi_1 > 0, \psi_2 < 0$ 时为一级失稳状态;③ $\psi_1 > 0, \psi_2 > 0$ 时为二级失稳状态。通过获取轮胎接地点、车辆重心和后桥铰接点的坐标,可以实时动态求解得到扩展 SSMA。结合式(7)~(10),可以计算出 4 个车辆轮胎接地点的 X/Y 坐标,然后对数字高程模型进行索引,以确定它们在 Z 方向上的高程值。最终,结合式(13)~(15),通过上述坐标可以获得每个状态面的法向量和合力向量,从而实现铰接工程车辆的稳定状态判断。

由于车辆在不同运动方向上将产生不同的轮胎接地点,为求解每个车辆坐标处的所有行驶区域范围内的稳定状态,将车辆转向角设置为直行、最大左转向和最大右转向 3 种情况,车辆航向角

设置为东、南、西、北、东南、西南、西北和东北 8 个方向。总共构建了 24 种状态组合解算车辆在不同运动方向下的稳定状态,如图 9 所示,求解后选取 24 种组合中行驶状态最差的扩展 SSMA 判断当前车辆稳定状态。

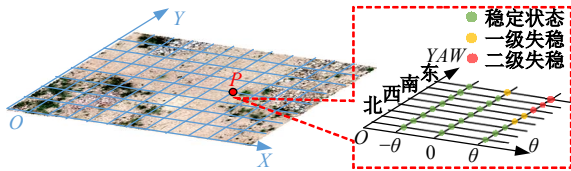


图 9 正交解算行驶区域

Fig. 9 Driving area calculated by orthogonal solution

通过车辆-地形耦合模型获得扩展 SSMA,在静态风险障碍物的基础上,进一步考虑车辆行驶的动态运动特性,在斜坡地形中标注出区域安全等级语义,如图 10 所示,根据稳定状态将区域行驶安全语义分割为 3 个等级:安全区域、一级危险区域和二级危险区域。从图中可以看出,随着地形坡度的增加,一级危险区域和二级危险区域明显增多,且二级危险区域出现在坡度更大的斜坡地形中,使得车辆侧翻风险变大,此时行驶安全性将大大降低,为工作车辆行驶作业有效提供了危险预警信息。

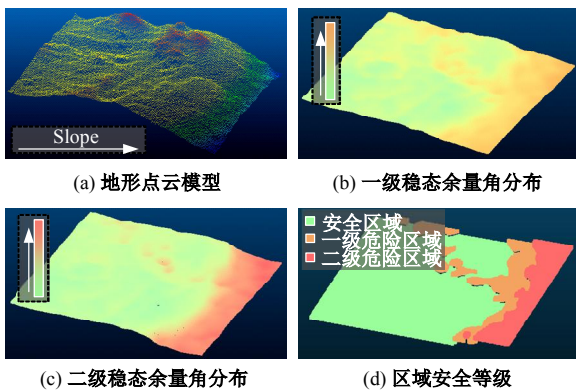


图 10 区域安全等级语义分割

Fig. 10 Semantic segmentation of driving safety level

3 非结构地形多层地图构建与验证

3.1 多层地图构建

在离线处理获得上述地图层及语义信息后,结合式(1),将上述获得各个地图数据进行统一压缩,各地图层采用相同数据格式进行存储,最终获得地形点云模型、数字高程模型、二维 RGB 模型、数字梯度模型、风险障碍语义信息、区域安全等级语义信息 6 个索引地图层,构建的非结构地形多

层地图如图 11 所示。每一层的映射数据可以通过 X/Y 坐标进行函数索引,地形点云模型是所有地图层的测绘数据源,二维 RGB 模型可用于快速匹配定位,数字高程模型可以提供姿态信息,并与数字梯度模型相结合,进一步开发了安全语义信息,为无人驾驶工程车辆的安全作业提供引导。

3.2 地形测绘验证

为了验证地形点云模型的地图精度,采用激光测距仪测量地图建模误差,如图 12 所示,该实验区域包含杂草、石块、不规则坡度等非结构地形。在实验区域设置 25 个测绘检查点,均匀分布在测绘区域内,确保覆盖所有地形特征。通过激光测距仪测量检查点的实际距离,各点测量 3 次取均值,通过计算点云模型距离值与测距仪测量距离值之间的误差,获得地形点云模型的每百米相对误差,如表 2 所示。可以看出,地形点云模型的建模误差范围基本分布在 0.01~0.1 m 内。通过检查点的现场测量计算,得到地形点云模型的误差均值为 0.060 m,均方根误差为 0.024 m,能够满足复杂非结构地形的自主作业需求,并有效用于其他地图层的构建。

3.3 语义分割验证

为了验证风险障碍语义的分割精度,采用人工标记语义结果作为对比,分析风险障碍语义分割的交并比。选取具有一定坡度的非结构地形,利用数字梯度模型与数字高程模型进行风险障碍的语义分割结果如图 13 所示。可以看出,采用数字梯度模型的语义分割结果与人工标记的语义分割结果保持高度一致,实现了障碍物区域边界的准确识别。而在数字高程模型中的语义分割未能准确识别障碍物区域,其分割精度较低。采用数字梯度模型的语义分割交并比为 81.0%,采用数字高程模型的语义分割交并比为 34.1%,语义分割通常以交并比大于 50% 作为语义命中的判据,通过交并比对比进一步验证了数字梯度模型语义分割的准确性,为非结构地形环境作业有效提供了风险障碍区域信息。

为进一步验证复杂非结构地形的语义分割有效性,图 14 给出了一个含有各种凹凸障碍物的非结构地形语义分割结果,该地形为加拿大自主空间机器人实验室(ASRL)的模拟行星地形数据集^[23]。采用数字高程模型的语义分割结果如图 14(a)所示,由于高程模型缺乏坡度、坡向等梯度

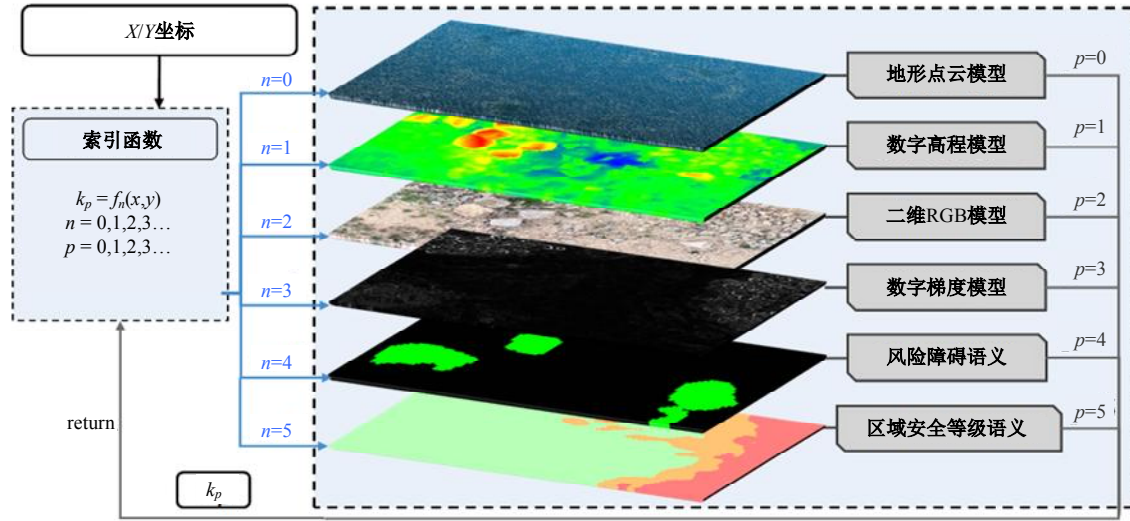


图 11 非结构地形多层地图

Fig. 11 Multi-layer map for unstructured terrain

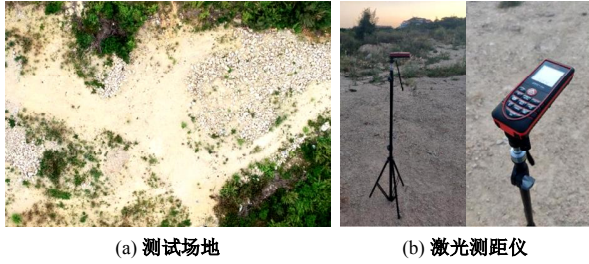


图 12 地图构建实验测试

Fig. 12 Field experiment of map construction

表 2 地形点云模型的检查点误差

Table 2 Checkpoint error of terrain model

检查点	误差/m	检查点	误差/m
1	0.064	14	0.072
2	0.086	15	0.038
3	0.036	16	0.056
4	0.052	17	0.044
5	0.102	18	0.046
6	0.106	19	0.066
7	0.084	20	0.052
8	0.042	21	0.030
9	0.012	22	0.072
10	0.032	23	0.066
11	0.084	24	0.090
12	0.070	25	0.062
13	0.046		

信息,数据集中的黑色点云没有完全分离,缺失了部分区域障碍物信息,无法准确地检测到风险障碍物。采用数字梯度模型的语义分割结果如图 14(b)所示,结合风险障碍物高度信息,非结构地形的各种凹凸障碍物被准确分割,其中红色标记

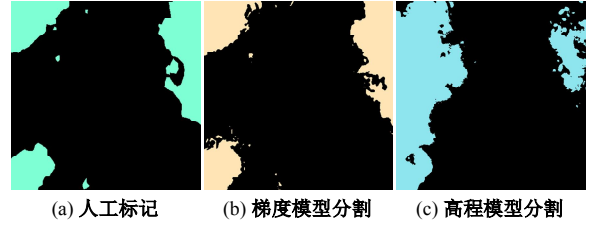


图 13 坡度地形风险障碍语义分割对比

Fig. 13 Comparison of semantic segmentation of risk obstacle in sloping terrain

的为凸障碍物(彩图参见电子版),黑色标记的为凹障碍物,与数据集实际地形高度吻合,实现了更精准的风险障碍物预警。

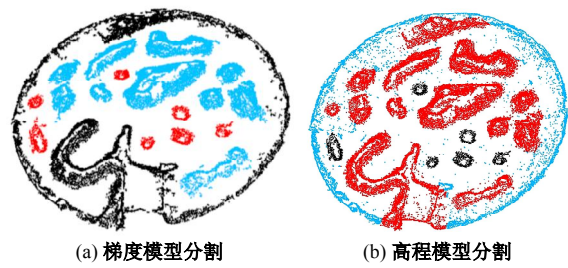


图 14 凹凸地形风险障碍语义分割对比

Fig. 14 Comparison of semantic segmentation of risk obstacle in uneven terrain

由于车辆-地形耦合模型中的扩展 SSMA 直接决定了区域行驶安全等级的语义分割精度,通过惯导传感器测量获得工程车辆样机的扩展 SSMA 测量值,并将其与车辆-地形耦合模型计算获得的扩展 SSMA 模型值进行对比,在上述 25 个测绘检查点的一级失稳余量角 ψ_1 与二级失稳余量角 ψ_2 对比结果如图 15 所示。通过对比可以看出,

一级失稳余量角与二级失稳余量角较好跟踪了实际测量值,扩展 SSMA 的测量值结果与模型值结果基本吻合,可以准确地表征工程车辆的稳定运动状态,能够有效应用于区域行驶安全等级的语义分割。

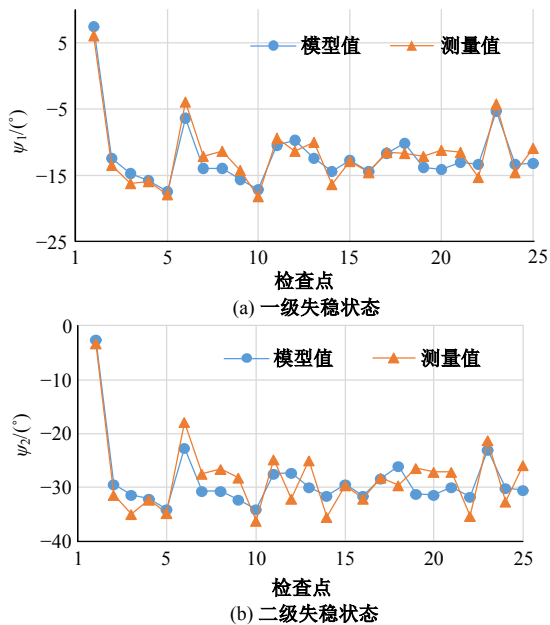


图 15 扩展 SSMA 测试与模型结果对比

Fig. 15 Comparison between actual and model results of extended SSMA

4 结 论

(1) 建立的车辆-地形耦合模型能够获取车辆实际行驶侧倾状态,通过滤除无效障碍,有效提高了障碍语义信息与区域安全等级语义信息的可用性,可为无人工程车辆提供丰富的环境先验信息。

(2) 在实验验证中,通过激光测距仪获得地形点云模型的百米误差均值为 0.06 m,风险障碍语义分割交并比达到 81.0%,扩展 SSMA 能够合理反映车辆侧翻安全稳定性,地形测绘与语义分割验证了语义地图的有效性。

(3) 基于无人机倾斜摄影的多层索引地图以厘米级精度压缩了 6 个数据层,大大降低了数据量,应用于矿山等非结构场景建模具有低成本及快速周期性等优势。

参考文献:

- [1] Jiang K, Yang D G, Liu C R, et al. A flexible multi-layer map model designed for lane-level route planning in autonomous vehicles[J]. *Engineering*, 2019, 5(2): 305-318.
- [2] Bao Z B, Hossain S, Lang H X, et al. A review of high-definition map creation methods for autonomous driving[J]. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2023, 122: No. 106125.
- [3] Chen W F, Zhou C J, Shang G T, et al. SLAM overview: from single sensor to heterogeneous fusion [J]. *Remote Sensing*, 2022, 14(23): 6033.
- [4] Yi S Q, Lyu Y, Hua L, et al. Light-LOAM: a lightweight lidar odometry and mapping based on graph-matching[J]. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2024, 9(4): 3219-3226.
- [5] Zhang X X, Lai J J, Xu D L, et al. 2D Lidar-based SLAM and path planning for indoor rescue using mobile robots[J]. *Journal of Advanced Transportation*, 2020: No. 8867937.
- [6] Matthies L, Maimone M, Johnson A, et al. Computer vision on Mars[J]. *International Journal of Computer Vision*, 2007, 75(1): 67-92.
- [7] Cheng Y, Maimone M W, Matthies L. Visual odometry on the Mars exploration rovers—a tool to ensure accurate driving and science imaging[J]. *IEEE Robotics & Automation Magazine*, 2006, 13(2): 54-62.
- [8] Ma J, Bajracharya M, Susca S, et al. Real-time pose estimation of a dynamic quadruped in GPS-denied environments for 24-hour operation[J]. *The International Journal of Robotics Research*, 2016, 35(6): 631-653.
- [9] Sock J, Kim J, Min J, et al. Probabilistic traversability map generation using 3D-LIDAR and camera[C]// *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, Stockholm, Sweden, 2016: 5631-5637.
- [10] 李兆冬, 赵熙俊, 杨婷婷, 等. 越野环境下高精地图关键技术和应用展望[J]. *兵工学报*, 2023, 44(2): 1-11.
Li Zhao-dong, Zhao Xi-jun, Yang Ting-ting, et al. Key technologies and application prospects for high-definition map in off-road environments[J]. *Acta Armamentarii*, 2023, 44(2): 1-11.
- [11] 李立, 鲍宇健, 杨文臣, 等. 路侧多源感知数据集规范化构建方法[J]. *吉林大学学报: 工学版*, 2025, 55(2): 529-536.
Li Li, Bao Yu-jian, Yang Wen-chen, et al. Standardized constructing method of a roadside multi-source sensing dataset[J]. *Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition)*, 2025, 55(2): 529-536.
- [12] Huang C, Zhang H M, Zhao J H. High-efficiency de-

- termination of coastline by combination of tidal level and coastal zone DEM from UAV tilt photogrammetry[J]. *Remote Sensing*, 2020, 12(14): No. 2189.
- [13] 韩友美, 艾林, 刘东明, 等. 基于轻小型无人机城区 1:500 地形图测绘技术研究[J]. *测绘工程*, 2023, 32(4): 51-58.
- Han You-mei, Ai Lin, Liu Dong-ming, et al. Research on 1:500 topographic map measurement technology of urban area based on light and small UAV[J]. *Engineering of Surveying and Mapping*, 2023, 32(4): 51-58.
- [14] Hu X Y, Li D. Research on a single-tree point cloud segmentation method based on UAV tilt photography and deep learning algorithm[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2020, 13: 4111-4120.
- [15] Chen W, Zhu Q Y, Zheng X P, et al. A feature fusion-based optimization approach for unstructured terrain modeling in agriculture[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2024, 225: No. 109276.
- [16] 王顺桀, 刘前结, 李晨阳, 等. 铰接轮式装载机的横向动力学建模分析[J]. *机电工程*, 2021, 38(12): 1529-1537.
- Wang Shun-jie, Liu Qian-jie, Li Chen-yang, et al. Lateral dynamic modeling of articulated wheeled loader[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2021, 38(12): 1529-1537.
- [17] Zhang X Y, Liu Q J, Liu J, et al. Using gyro stabilizer for active anti-rollover control of articulated wheeled loader vehicles[J]. *Journal of Systems and Control Engineering*, 2021, 235(2): 237-248.
- [18] 刘珺. 面向无人工程车辆的高精度地图构建及定位研究[D]. 厦门: 厦门大学航空航天学院, 2021.
- Liu Jun. Research on high precision mapping and positioning for unmanned engineering vehicle[D]. Xiamen: School of Aerospace Engineering, Xiamen University, 2021.
- [19] Huang T C, Chen X W, Hu H S, et al. Terrain-adaptive motion planner for articulated construction vehicles in unstructured environments[J]. *Automation in Construction*, 2024, 168: No. 105864.
- [20] Gianinetta M. Automatic digital terrain model generation using Cartosat-1 stereo images[J]. *Sensor Review*, 2008, 28(4): 299-310.
- [21] Wang L, You Z H, Lu W, et al. Attention-aware Sobel graph convolutional network for remote sensing image change detection[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2024, 62: No. 4409912.
- [22] Zhu Q Y, Yi J, Chen H Y, et al. Lateral stability simulation and analysis for wheel loaders based on the steady-state margin angle[J]. *International Journal of Modelling, Identification and Control*, 2014, 22(3): 185-194.
- [23] Tong C H, Gingras D, Larose K, et al. The Canadian planetary emulation terrain 3D mapping dataset[J]. *International Journal of Robotics Research*, 2013, 32(4): 389-395.