

Robust Path Tracking Controller Design for Teleoperated Ground Vehicles under Delays and Environmental Uncertainties

Qiang ZHANG¹, Peiqi PENG¹, Zhi HUANG¹, Lingfang YANG², Xiaolin SONG¹

¹College of Mechanical and Vehicle Engineering, Hunan University, 2nd South Lushan Road, 410009, Changsha, China

²College of Civil Engineering, Hunan University, 2nd South Lushan Road, 410009, Changsha, China

Email: zhangqiang@hnu.edu.cn

Abstract: The development of teleoperation technology is of great significance in promoting scientific and technological progress and solving practical problems, which not only improves the safety and accuracy of operation, but also expands the scope of human activities, especially in those areas where there are limitations on direct human involvement. Operators remotely control vehicles through video feedback, which lacks the presence of information about the vehicle's surroundings, which often leads to operator misuse and affects the stability of remotely operated vehicle systems. To address this problem, this study proposes a Preview- LPV controller that can be applied to teleoperated vehicle systems, which can effectively cope with the uncertainties induced by the ground environment in teleoperated systems, achieve stable and efficient path tracking, and provide an effective driving aid for the operator. Moreover, the controller is evaluated under the previously proposed Predictive Trajectory Guidance Control framework (PTGC) for human-in-the-loop experiments, and the results show that the proposed controller performs well in a large-delay, high-road surface uncertainty environment.

Keywords: Delay compensation; Preview; LPV; Teleoperated ground vehicles; Human-in-the-loop simulation

延迟和环境不确定性条件下遥控地面车辆的鲁棒路径跟踪控制器设计

张 强¹, 彭沛淇¹, 黄 智¹, 杨灵芳², 宋晓琳¹

¹ 湖南省长沙市麓山南二路 410009 号湖南大学机械与运载工程学院

² 湖南大学土木工程学院 (地址: 长沙市麓山南路 2 号, 邮编: 410009)

Email: zhangqiang@hnu.edu.cn

摘要: 遥控技术的发展对于推动科技进步和解决实际问题具有重要意义, 它不仅提高了操作的安全性和精确性, 还扩展了人类活动的范围, 尤其是在那些对人类直接参与有限制的领域。操作员通过视频反馈来远程控制车辆, 缺乏对车辆周围环境信息的临场感受, 这往往导致操作员的误操作, 影响遥控操作车辆系统的稳定性。针对这一问题, 本研究提出了一种能够适用于远程操控车辆系统的预瞄-线性变参(Preview-LPV)控制器, 该控制器能够有效应对在遥控系统中由地面环境引起的不确定性, 实现稳定高效的路径跟踪, 为操作员者提供了一种有效的驾驶辅助手段。并且该控制器在先前提出的预测轨迹引导控制框架(PTGC)下进行了人在环实验, 结果表明所提出的控制器在大延迟高路面不确定性环境中表现良好。

关键词: 延迟补偿, 预瞄, LPV, 遥控地面车辆, 人在环仿真

1 引言

远程操纵系统能够在确保人类安全的前提下，将人类的认知技能和专业领域知识最大限度地扩展到危险区域^{[1][2]}。遥控地面车辆因其安全、高效和低成本的优势，在军事和民用领域都有广泛的应用，如侦察、路线清理、监视和救援等^{[3][4]}。

远距离操作应注意两个问题。首先是延迟^[5]，包括通信中的控制延迟 t_{d1} 和反馈延迟 t_{d2} 。这种往返延迟 $t_{d1} + t_{d2}$ 会导致操作员指令与车辆响应之间的时间不同步，从而导致操纵性下降^{[6][7]}。在低延迟情况下，操作员可以预测车辆的反应并做出调整。而明显的延迟会严重影响这种能力，增加认知负荷，破坏远程操作系统的稳定性^[8]。例如，指令和反应之间缺乏明确的对应关系，往往会产生转向过度。

第二个问题是透明度差^[9]。由于视频反馈是获取车辆状态和周围环境的唯一输入，因此操作员的态势感知能力受到限制，从而阻碍了对环境变化的及时响应。对于遥控机器人来说，透明度是通过触觉反馈来实现的。对于遥控车辆，尤其是高速行驶的车辆，视觉反馈比触觉反馈更为重要^{[10][11]}，而其他可提高透明度的信息，如转向力反馈、加速度、偏航率等，由于成本和技术限制而无法提供。

在之前的研究中，我们开发了预测轨迹引导控制(Predicted Trajectory Guidance Control, PTGC)框架，以应对通信延迟带来的挑战^{[12][13]}。这种方法利用监督控制框架，通过深度学习模型来预测远程操作员的预定轨迹。在车辆方面，我们采用了 Stanley^[14]控制器进行预测轨迹跟踪控制。即使初始路径偏差较大，所提出的系统在恒定附着力的道路上也能很好地工作，但当道路条件发生变化时，就会出现很大的转向过冲。原因是远程操作员很难感知道路附着力的变化，因此会进行不正确的转向操作来纠正路径偏差。这说明，由于透明度差，该系统对环境的不确定性非常敏感。针对这一问题，我们开发了预瞄-线性变参(Preview&Linear Parameter-Varying, Preview-LPV)轨迹跟踪控制器，以增强 PTGC 框架对环境不确定性的适应性，尤其是道路附着力的变化。该控制器集成了预瞄机制和 LPV 模型，旨在通过在道路附着力不确定的情况下输出远程操作员所期望的一致的车辆响应来补偿透明度差的问题。其主要贡献总结如下

1) Preview-LPV 控制器在各种路况下都能保持稳定的性能，证明了其在动态环境中对遥控地面车辆至关重要的鲁棒性。

2) 利用前馈增益补偿，Preview-LPV 控制器与驾驶员意图紧密结合，确保了预期的轨迹跟踪响应。这最大限度地减少了因透明度有限而导致的不一致性，提高了遥控操作场景中的整体控制可预测性和直观性。

2 预测轨迹引导控制框架

PTGC 框架如图 1 所示，其中远程操作员对周围环境的感知洞察力和眼球运动中蕴含的未来意图被用来预测操作员的预定轨迹，然后将预测轨迹与车辆状态对齐并用于引导车辆。因此，轨迹跟踪控制器应确保轨迹跟踪的准确性和鲁棒性。换句话说，PTGC 框架将远程操纵系统中的透明度问题转换为轨迹跟踪问题。有关具体设计细节，请参阅我们以前的论文^[12]。

3 轨迹跟踪控制器设计

跟踪控制问题一般采用最优控制 (Optimal control, OC)，它能在有限视界内平衡控制误差和控制平滑性。由于预测轨迹包含了操作员的未来意图，能使控制器更早地响应操作员的期望，因此设计了一种预瞄控制器，以实现更精确的轨迹跟踪。考虑到计算成本，只采用线性模型和控制器。然而，车辆-道路是时变非线性系统，因此设计了 LPV 控制器来解决时变和非线性的特点。

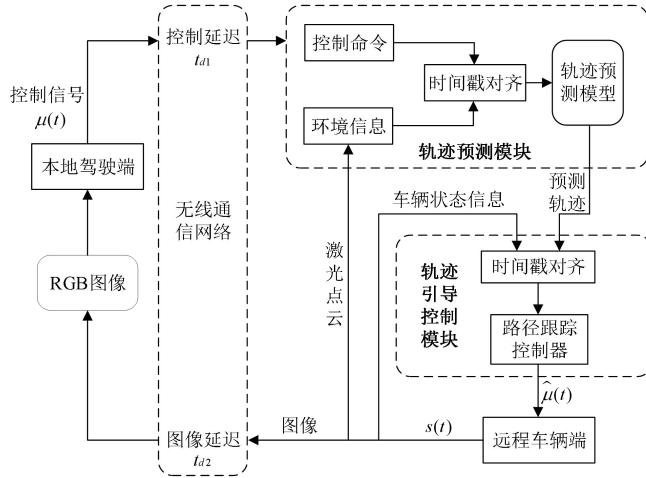


Figure 1. Delay compensation cooperative control framework

图 1 延迟补偿协同控制框架

3.1 车辆横向误差动态建模

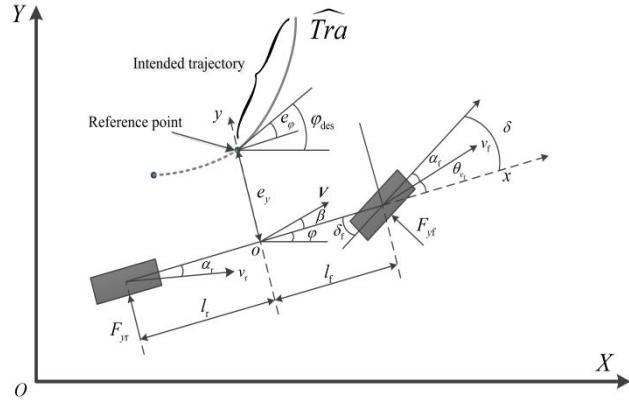


Figure 2. Vehicle dynamics model with predicted trajectories. OXY is the inertial coordinate system and oxy is the body-fixed coordinate system.

图 2. 带有预测轨迹的车辆动力学模型。 OXY 是惯性坐标系, oxy 是本地车身固定坐标系。

如图 2 所示, 简化的车辆横向动力学建模一般采用线性自行车模型。基于轮胎动力学的线性假设^[15], 横向加速度和偏航角加速度由以下公式描述

$$\dot{v}_y = -\frac{2C_{af} + 2C_{ar}}{mv_x}v_y - \left(v_x + \frac{2l_f C_{af} - 2l_r C_{ar}}{mv_x}\right)\dot{\phi} + \frac{2C_{af}}{m}\delta \quad (1)$$

$$\ddot{\phi} = -\frac{2l_f C_{\alpha f} - 2l_r C_{\alpha r}}{I_z v_x} v_y - \frac{2l_f^2 C_{\alpha f} + 2l_r^2 C_{\alpha r}}{I_z v_x} \dot{\phi} + \frac{2l_f C_{\alpha f}}{I_z} \delta \quad (2)$$

其中, C_{af}/C_{ar} 为前/后轮胎的转弯刚度, l_f/l_r 是重心 (Center of Gravity, CG) 到前/后车轴的距离, φ 是车身航向角(OXY), δ 是前轮转向角, I_z 是车辆转动惯量, v_x/v_y 是车辆坐标系 oxy 中的纵向/横向速度, m 是车辆质量。

在轨迹跟踪问题中，车辆从重心 (CG) 到参考轨迹的横向误差为 e_y ，航向角误差 e_φ 定义为

$$e_\varphi = \varphi - \varphi_{\text{des}} \quad (3)$$

其中, φ_{des} 是引导轨迹的期望航向角。

给定参考路径曲率 c_R ，所需的偏航率为

$$\dot{\varphi}_{\text{des}} = v_x c_R \quad (4)$$

e_φ 和 e_y 的二次导数可表示为

$$\begin{cases} \ddot{e}_\varphi = \dot{\varphi} - \dot{\varphi}_{\text{des}} \\ \ddot{e}_y = \dot{v}_y + v_x \dot{e}_\varphi \end{cases} \quad (5)$$

将式(1)和(2)代入式(5)即可得出

$$\ddot{e}_y = \frac{2C_{\alpha f}}{m} \delta - \frac{2C_{\alpha f} + 2C_{\alpha r}}{mv_x} (\dot{e}_y - v_x e_\varphi) - \left(\frac{2l_f C_{\alpha f} - 2l_r C_{\alpha r}}{mv_x} + v_x \right) (\dot{e}_\varphi + \dot{\varphi}_{\text{des}}) + v_x \dot{e}_\varphi \quad (6)$$

$$\ddot{e}_\varphi = \frac{2l_f C_{\alpha f}}{I_z} \delta - \frac{2l_f C_{\alpha f} - 2l_r C_{\alpha r}}{I_z v_x} (\dot{e}_y - v_x e_\varphi) - \frac{2l_f^2 C_{\alpha f} + 2l_r^2 C_{\alpha r}}{I_z v_x} (\dot{e}_\varphi + \dot{\varphi}_{\text{des}}) - \ddot{\varphi}_{\text{des}} \quad (7)$$

我们进一步得到以下状态空间方程

$$\dot{x} = Ax + B\delta + Dc_R \quad (8)$$

其中

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{2C_{\alpha f} + 2C_{\alpha r}}{mv_x} & \frac{2C_{\alpha f} + 2C_{\alpha r}}{m} & -\frac{2l_f C_{\alpha f} + 2l_r C_{\alpha r}}{mv_x} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & \frac{-2l_f C_{\alpha f} + 2l_r C_{\alpha r}}{I_z v_x} & \frac{2l_f C_{\alpha f} - 2l_r C_{\alpha r}}{I_z} & -\frac{2l_f^2 C_{\alpha f} + 2l_r^2 C_{\alpha r}}{I_z v_x} \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{2C_{\alpha f}}{m} \\ 0 \\ \frac{2l_f C_{\alpha f}}{I_z} \end{bmatrix}, \quad D = \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{2l_f C_{\alpha f} - 2l_r C_{\alpha r}}{m} - v_x^2 \\ 0 \\ -\frac{2l_f^2 C_{\alpha f} + 2l_r^2 C_{\alpha r}}{I_z} \end{bmatrix}$$

状态向量 $x = [e_y, \dot{e}_y, e_\varphi, \dot{e}_\varphi]^T \in \mathbb{R}^4$, 控制输入为前轮转向角 $\delta \in \mathbb{R}$, 道路曲率 $c_R \in \mathbb{R}$ 被视为扰动。

3.2 预瞄控制

预测轨迹的时间跨度为 3 秒。预测轨迹的 c_R 包含操作员的未来意图, 公式(8)中的 c_R 可以使控制器更早地响应操作员的期望, 有利于轨迹跟踪和延迟补偿。路径跟踪(8)是一个有约束的非线性最优控制问题(Optimal Control Problem, OCP)。模型预测控制(Model Predictive Control, MPC)被广泛应用于此类问题。然而, MPC 在处理非线性干扰 c_R 时非常耗时。另一种解决方案是在预瞄(Preview)控制的基础上重建原始问题, 即把未来意图 c_R 纳入状态向量, 并提出一个增强的 LQR 问题, 在这个问题中, 可以高效地求解分析最优解^[15]。增广状态向量为

$$\begin{aligned} \mathcal{X}(k) &= \begin{bmatrix} x(k) \\ c_R(k) \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^{N+5} \\ c_R(k) &= [c_R(k), c_R(k+1), \dots, c_R(k+N)]^T \end{aligned} \quad (9)$$

其中, N 为预瞄步数。成本函数相应地改写为

$$\begin{aligned} J(\mathcal{X}, \delta) &= \frac{1}{2} \sum_{k=0}^M \mathcal{X}^T \bar{Q} \mathcal{X} + \bar{R} \delta^2 \\ \text{s. t. } \dot{\mathcal{X}} &= \bar{A} \mathcal{X} + \bar{B} \delta \\ \delta_{\min} < \delta &< \delta_{\max} \end{aligned} \quad (10)$$

其中 \bar{Q} and \bar{R} 是增广矩阵, \bar{A} and \bar{B} 是增广动力学矩阵, 它们的定义是

$$\begin{aligned}
\bar{\mathcal{Q}} &= \begin{bmatrix} \mathcal{Q}_{4 \times 4} & \mathcal{O}_{4 \times (N+1)} \\ \mathcal{O}_{(N+1) \times 4} & 0 \end{bmatrix}, \quad \bar{\mathcal{R}} \equiv \mathcal{R} \\
\bar{\mathcal{A}} &= \begin{bmatrix} \mathcal{A}_{4 \times 4} & \bar{\mathcal{D}}_{4 \times (N+1)} \\ \mathcal{O}_{(N+1) \times 4} & \mathcal{L}_{(N+1) \times (N+1)} \end{bmatrix}, \quad \mathcal{L} = \begin{bmatrix} \mathcal{O}_{N \times 1} & I_{N \times N} \\ 0 & \mathcal{O}_{1 \times N} \end{bmatrix} \\
\bar{\mathcal{D}} &= [\mathcal{D}_{4 \times 1} \quad \mathcal{O}_{4 \times N}], \quad \bar{\mathcal{B}} = \begin{bmatrix} \mathcal{B}_{4 \times 1} \\ \mathcal{O}_{(N+1) \times 1} \end{bmatrix}
\end{aligned} \tag{11}$$

下标表示矩阵或向量的维数, \mathcal{O} 表示零矩阵, I 表示单位矩阵。

3.3 线性变参 (LPV) 系统模型

车辆-道路系统具有时变性和非线性的特点, 例如速度变化、道路附着力变化、轮胎力饱和等。我们采用线性变参 (LPV) 控制器来处理环境和车辆状态不确定性的影响^[16]。

环境和车辆状态的不确定性主要包括纵向车速的变化 v_x 和路面附着力 μ 由于轮胎垂直负载随滑移角变化, 而滑移角又受路面摩擦系数影响 μ 。因此, 在 LPV 系统模型中, 轮胎侧偏刚度被视为一个变化参数, 表示为

$$C_{\alpha f} = \mu C_{\alpha f 0}, C_{\alpha r} = \mu C_{\alpha r 0} \tag{12}$$

其中 $C_{\alpha f 0}$ 和 $C_{\alpha r 0}$ 是前后轮胎的标称轮胎侧偏刚度。

根据公式 (20) 所示的预瞄控制器模型, 选择三个辅助时变参数 $\theta_1 = \mu/v_x, \theta_2 = v_x^2, \theta_3 = \mu$, 变化参数向量定义为 $\Theta = [\theta_1, \theta_2, \theta_3]^T$ 。基于 LPV 系统的预瞄控制器由以下公式给出

$$\begin{aligned}
\dot{\mathcal{X}} &= \bar{\mathcal{A}}(\Theta)\mathcal{X} + \bar{\mathcal{B}}(\Theta)\delta \\
Y &= E\mathcal{X} + F\delta
\end{aligned} \tag{13}$$

其中 Y 是输出向量, E 是输出矩阵, F 是控制矩阵,

$$\begin{aligned}
\bar{\mathcal{A}}(\Theta) &= \begin{bmatrix} \mathcal{A}(\Theta) & \bar{\mathcal{D}}(\Theta) \\ \mathcal{O} & \mathcal{L} \end{bmatrix}, \quad \bar{\mathcal{B}}(\Theta) = \begin{bmatrix} \mathcal{B}(\Theta) \\ \mathcal{O} \end{bmatrix} \\
\bar{\mathcal{D}}(\Theta) &= [\mathcal{D}(\Theta) \quad \mathcal{O}] \\
\mathcal{A}(\Theta) &= \begin{bmatrix} \mathcal{A}_{11}(\Theta) & \mathcal{A}_{12}(\Theta) \\ \mathcal{A}_{21}(\Theta) & \mathcal{A}_{22}(\Theta) \end{bmatrix}, \quad \mathcal{A}_{11}(\Theta) = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -\frac{2C_{\alpha f 0} + 2C_{\alpha r 0}}{m}\theta_1 \end{bmatrix} \\
\mathcal{A}_{12}(\Theta) &= \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ \frac{2C_{\alpha f 0} + 2C_{\alpha r 0}}{m}\theta_3 & -\frac{2l_f C_{\alpha f 0} - 2l_r C_{\alpha r 0}}{m}\theta_1 \end{bmatrix} \\
\mathcal{A}_{21}(\Theta) &= \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & -\frac{2l_f C_{\alpha f 0} - 2l_r C_{\alpha r 0}}{I_z}\theta_1 \end{bmatrix} \\
\mathcal{A}_{22}(\Theta) &= \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ \frac{2l_f C_{\alpha f 0} - 2l_r C_{\alpha r 0}}{I_z}\theta_3 & -\frac{2l_f^2 C_{\alpha f 0} + 2l_r^2 C_{\alpha r 0}}{I_z}\theta_1 \end{bmatrix} \\
\mathcal{B}(\Theta) &= \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{2C_{\alpha f 0}}{m}\theta_3 \\ 0 \\ \frac{2l_f C_{\alpha f 0}}{I_z}\theta_3 \end{bmatrix}, \quad \mathcal{D}(\Theta) = \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{2l_f C_{\alpha f 0} - 2l_r C_{\alpha r 0}}{m}\theta_1 - \theta_2 \\ 0 \\ -\frac{2l_f^2 C_{\alpha f 0} + 2l_r^2 C_{\alpha r 0}}{I_z}\theta_1 \end{bmatrix}
\end{aligned}$$

$\mathcal{A}(\Theta), \mathcal{B}(\Theta)$, 和 $\mathcal{D}(\Theta)$ 写为

$$\begin{aligned}
A(\Theta) &= A_0 + \sum_{i=0}^3 \theta_i A_i \\
B(\Theta) &= B_0 + \sum_{i=0}^3 \theta_i B_i \\
D(\Theta) &= D_0 + \sum_{i=0}^3 \theta_i D_i
\end{aligned} \tag{14}$$

其中

$$\begin{aligned}
A_0 &= \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, A_2 = O_{4 \times 4}, A_3 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{2C_{\alpha f 0} + 2C_{\alpha r 0}}{m} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{l_f C_{\alpha f 0} - l_r C_{\alpha r 0}}{I_z} & 0 \end{bmatrix} \\
A_1 &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{2C_{\alpha f 0} + 2C_{\alpha r 0}}{m} & 0 & -\frac{l_f C_{\alpha f 0} - l_r C_{\alpha r 0}}{m} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{l_f C_{\alpha f 0} - l_r C_{\alpha r 0}}{I_z} & 0 & -\frac{l_f^2 C_{\alpha f 0} + l_r^2 C_{\alpha r 0}}{I_z} \end{bmatrix} \\
B_0 &= O_{4 \times 1}, B_1 = O_{4 \times 1}, B_2 = O_{4 \times 1}, B_3 = \begin{bmatrix} 0 & \frac{2C_{\alpha f 0}}{m} & 0 & \frac{2l_f C_{\alpha f 0}}{I_z} \end{bmatrix}^T \\
D_0 &= O_{4 \times 1}, D_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{2l_f C_{\alpha f 0} - 2l_r C_{\alpha r 0}}{m} \\ 0 \\ -\frac{2l_f^2 C_{\alpha f 0} + 2l_r^2 C_{\alpha r 0}}{I_z} \end{bmatrix}, D_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ -1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, D_3 = O_{4 \times 1}
\end{aligned}$$

这些辅助时变参数 θ_1, θ_2 和 θ_3 是独立的。考虑到 $\theta_i \in [\theta_i^{\min}, \theta_i^{\max}]$ $i \in (i = 1, 2, 3)$ ，因此参数向量 Θ_j 有八个顶点。

$$\begin{aligned}
\Theta_1 &= \begin{bmatrix} \mu_{\max} & (v_x^{\max})^2 & \mu_{\max} \\ \frac{\mu_{\max}}{v_x^{\min}} & (v_x^{\max})^2 & \mu_{\max} \end{bmatrix}^T, \Theta_2 = \begin{bmatrix} \mu_{\max} & (v_x^{\max})^2 & \mu_{\min} \\ \frac{\mu_{\max}}{v_x^{\min}} & (v_x^{\max})^2 & \mu_{\min} \end{bmatrix}^T \\
\Theta_3 &= \begin{bmatrix} \mu_{\max} & (v_x^{\min})^2 & \mu_{\max} \\ \frac{\mu_{\max}}{v_x^{\max}} & (v_x^{\min})^2 & \mu_{\max} \end{bmatrix}^T, \Theta_4 = \begin{bmatrix} \mu_{\min} & (v_x^{\max})^2 & \mu_{\max} \\ \frac{\mu_{\min}}{v_x^{\max}} & (v_x^{\max})^2 & \mu_{\max} \end{bmatrix}^T \\
\Theta_5 &= \begin{bmatrix} \mu_{\max} & (v_x^{\min})^2 & \mu_{\min} \\ \frac{\mu_{\max}}{v_x^{\min}} & (v_x^{\min})^2 & \mu_{\min} \end{bmatrix}^T, \Theta_6 = \begin{bmatrix} \mu_{\min} & (v_x^n)^2 & \mu_{\min} \\ \frac{\mu_{\min}}{v_x^n} & (v_x^n)^2 & \mu_{\min} \end{bmatrix}^T \\
\Theta_7 &= \begin{bmatrix} \mu_{\min} & (v_x^{\min})^2 & \mu_{\max} \\ \frac{\mu_{\min}}{v_x^{\max}} & (v_x^{\min})^2 & \mu_{\max} \end{bmatrix}^T, \Theta_8 = \begin{bmatrix} \mu_{\min} & (v_x^{\min})^2 & \mu_{\min} \\ \frac{\mu_{\min}}{v_x^{\max}} & (v_x^{\min})^2 & \mu_{\min} \end{bmatrix}^T
\end{aligned} \tag{15}$$

因此，我们可以得到参数变化向量 Θ_j^n ($j = 1, 2, \dots, 8$)，公式(14)改写为

$$\begin{aligned}
A_j(\Theta_j) &= A_0 + \sum_{i=0}^3 \Theta_j[i] A_i \\
B_j(\Theta_j) &= B_0 + \sum_{i=0}^3 \Theta_j[i] B_i, \text{ if } v_x \in (v_x^{n-1}, v_x^n) \\
D_j(\Theta_j) &= D_0 + \sum_{i=0}^3 \Theta_j[i] D_i
\end{aligned} \tag{16}$$

此外，带有 8 个顶点的 Preview-LPV 路径跟踪控制模型表示为

$$G(\Theta) = \begin{bmatrix} \bar{A}(\Theta) & \bar{B}(\Theta) \\ E & F \end{bmatrix} = \sum_{j=1}^8 \Phi_j \begin{bmatrix} A_j(\Theta_j) & B_j(\Theta_j) \\ E & F \end{bmatrix} \tag{17}$$

其中 Φ_j 是八个顶点的权重。

$$\Theta = \sum_{j=1}^8 \Phi_j \Theta_j, \quad \Phi_j \geq 0, \quad \sum_{j=1}^8 \Phi_j = 1 (j = 1, 2, \dots, 8) \tag{18}$$

对于每个速度子区间，八个顶点的权重通过线性插值获得。

$$\begin{aligned}
\Phi_1 &= abc, \Phi_2 = ab(1-c), \Phi_3 = a(1-b)c, \Phi_4 = (1-a)bc \\
\Phi_5 &= a(1-b)(1-c), \Phi_6 = (1-a)b(1-c) \\
\Phi_7 &= (1-a)(1-b)c, \Phi_8 = (1-a)(1-b)(1-c)
\end{aligned} \tag{19}$$

其中

$$a = \frac{\theta_1 - \theta_{1\min}}{\theta_{1\max} - \theta_{1\min}}, b = \frac{\theta_2 - \theta_{2\min}}{\theta_{2\max} - \theta_{2\min}}, c = \frac{\theta_3 - \theta_{3\min}}{\theta_{3\max} - \theta_{3\min}}$$

3.4 Preview-LPV 控制器设计

公式(13)的离散时间系统表示为

$$x(k+1) = \bar{A}(\Theta_j)x(k) + \bar{B}(\Theta_j)\delta(k) \tag{20}$$

公式(20)是一个线性时不变系统，采用公式 (21) 中的成本函数，利用 LQR 来解决这个最优控制问题。

$$\begin{aligned}
J^*[x(k)] &= \min_{\delta(k)} \left\{ \frac{1}{2} [x(k)^T \bar{Q} x(k) + \bar{R} \delta_j^2(k)] \right. \\
&\quad \left. + J^*[x(k+1)] \right\}
\end{aligned} \tag{21}$$

控制规律 $\delta_j(k)$ 如下

$$\begin{aligned}
\delta_j^*(k) &= - \left(\bar{R} + \bar{B}^T(\Theta_j) \bar{P} \bar{B}(\Theta_j) \right)^{-1} \bar{B}^T \bar{P} \bar{A}(\Theta_j) x(k) \\
&= -K_j x(k)
\end{aligned} \tag{22}$$

其中 $K_j \in \mathbb{R}^{N+5}$ 是反馈增益向量， \bar{P} 是黎卡提方程的解

$$\bar{P} = \bar{Q} + \bar{A}^T \beta \bar{P} \bar{A} \tag{23}$$

通过解耦原始状态 $x(k)$ 和增强状态 $C_R(k)$ ，顶点的控制法则被分为两部分：反馈控制和前馈控制。

$$\delta_j^*(k) = -K_{bj}^j x(k) - K_{fj}^j C_R(k) \tag{24}$$

其中 $K_j = [K_b^j \ K_f^j]$ ； K_b^j 是反馈增益， K_f^j 是预瞄控制的前馈增益，与未来轨迹的曲率相对应。前馈增益允许转向控制将未来意图考虑在内，这也减少延迟。

4 人在环仿真实验

遥控地面车辆(Teleoperated Ground Vehicles, TGVs)是一个人在环控制系统，其中人的操作是关键组成部分。我们基于提出的 PTGC 框架构建了一个人在环仿真平台，以验证 Preview-LPV 控制器的有效性。

4.1 仿真平台

如图 3 所示，我们为远程操作实验开发了一个实时驾驶员在环仿真平台[12]。该仿真平台由四个关键部分组成：驾驶站、车路系统、引导跟踪控制模块和通信网络。

在驾驶站，远程操作员使用罗技 G27 操纵杆进行转向、制动和加速控制，并使用显示器进行延迟视觉反馈。

Carla 和 Trucksim 构成了车路系统的核心。场景和传感器（包括前视摄像头和 3D 激光雷达）在 Carla 中模拟，而车辆动力学则在 Trucksim 中建模。Carla 和 Trucksim 之间通过 CAN 总线进行通信，交换车辆状态。其中在 Trucksim 中可以对路面附着系数进行设置，模拟路面不确定性。

在车辆端，轨迹跟踪控制器会将预测轨迹与车辆状态时间对齐，并将其作为制导轨迹。然后，Preview-LPV 控制器被用来跟踪该引导轨迹，并生成控制指令控制车辆。

通信网络由一个 ROS 节点模拟。控制指令和视觉反馈被发送到该 ROS 节点，并在先进先出（First In First Out, FIFO）队列中排队。通信延迟通过设置 FIFO 管道的深度大于零来实现。与真实的远程操纵系统相比，模拟的只是车路系统动力学和通信系统，而人机界面几乎完全相同。因此，仿真设置可以确保系统的保真度。

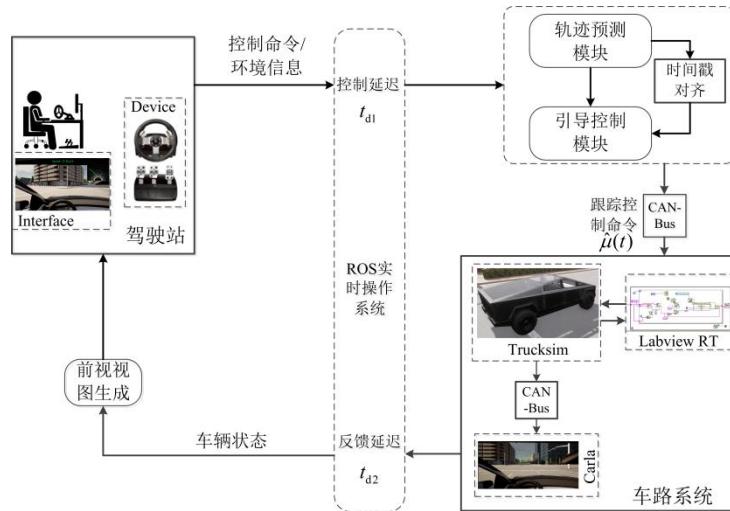


Figure 3 Human-in-the-loop simulation platform for ground vehicle teleoperation system

图 3 地面车辆遥控系统人在环仿真平台

4.2 测试道路和实验设计

路线包括直线段和弯道段（如图 4 (a) 所示），弯道段的路面附着力会发生突然变化（如图 4 (b) 所示）。如图 4(b)所示，以评估控制器的鲁棒性。直线段评估路径跟踪的稳定性和调整过程，而曲线段则评估对阶跃或斜坡输入的瞬态响应。路线总长度为 300 米，包括三个半径为 14 米的曲线段和一个半径为 44 米的曲线段。

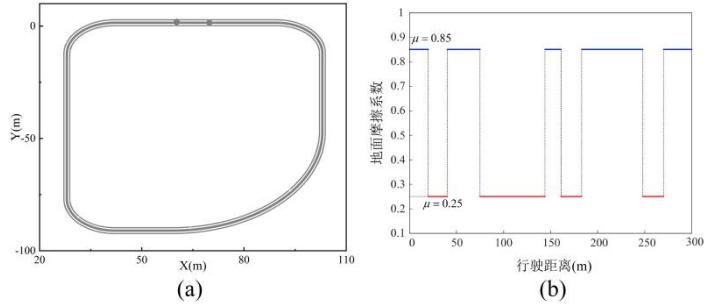


Figure 4. Overview of the test route

图 4. 测试路线概览

本实验的主要目标是研究在通信延迟的工况下, Preview-LPV 控制器对 PTGC 框架应对环境不确定性的增强效果。此外, 还对结合其他两种控制方法的 PTGC 框架进行了比较评估, 包括 LQR 和 Preview 控制器, 直接控制(Direct Control, DC)方法作为基准。DC 方法指的是没有任何辅助的直接遥控操作。延迟设置为 800ms 反馈延迟。本文设计了两个间接评价指标: 偏离道路中心线距离(Deviation to centerline $D2C$)和航向偏离误差(Heading deviation to centerline, $H2C$)。这两个指标共同构成了对控制器性能的评估体系, 能够间接反映控制器在横向控制和航向控制方面的表现。 $D2C$ 为车辆实际行驶路径与规定道路中心线之间的横向距离偏差的平方。 $D2C$ 指标直接反映了控制器在横向控制方面的精确程度。一个较小的 $D2C$ 值表示车辆能够更紧密地沿着道路中心线行驶, 而较大的 $D2C$ 值则意味着车辆的横向偏差更大。在通信延迟的情况下, 控制器需要能够快速准确地响应, 以最小化 $D2C$ 值, 从而保证车辆的横向稳定性和安全性。 $H2C$ 是指车辆实际朝向与预定路径朝向之间的偏差。这一指标衡量了车辆对路径的对准程度, 从而反映了航向控制系统的性能。一个较小的 $H2C$ 值意味着车辆能够更好地保持与预定路径的一致性, 而较大的 $H2C$ 值则表明车辆在航向上存在较大的偏差。

在本次实验中挑选了两位具有驾驶经验的操作者, 要求其在完全相同的驾驶条件下在驾驶站分别进行操作。

4.3 实验结果

本实验对比了结合 LQR、Preview 和 Preview-LPV 三种控制器的 PTGC 框架在延迟(800ms)和道路附着突变情况下的遥控操作车辆轨迹跟踪性能, 结果如图 5 所示。测试表明, PTGC 框架对延迟有较好的补偿作用, 无论使用何种控制器, 相较于 DC 方法 PTGC 方法都能保证车辆的平稳运行。相反 DC 方法在延迟和道路附着突变的复合影响下出现了车辆蛇形前进情况, 操作员无法保证车辆的控制稳定性。然而, 结合不同控制器的三种控制 PTGC 方法亦有优劣。尽管三种控制策略在直线行驶阶段均表现稳定, 但在弯道行驶时, 地面摩擦系数的变化显著影响了控制效果。LQR 对摩擦系数变化较为敏感, 导致其在弯道中出现较大轨迹偏差, 尤其在转弯区域偏离预定路径。而 Preview 和 Preview-LPV 策略在应对复杂路况时表现出更好的控制精度, 弥补了 LQR 的不足。

Preview 控制器在直线行驶时具有较高的控制精度, 但在曲线行驶阶段, 由于预瞄控制提前转向, 转向点的控制精度有所下降。此外, 面对道路摩擦系数的变化, Preview 控制器未能有效调整策略以适应。相比之下, Preview-LPV 控制器展现出更强的适应性和鲁棒性, 能够更好地应对摩擦系数的突变, 保持平稳的控制效果, 并维持车辆在预定轨迹上的稳定行驶。

对于操作者 2, LQR 控制器同样在转弯和路面突变处明显偏离目标轨迹, 且难以及时回到车道。Preview 控制器与操作者 1 的结果相似, 提前转向且无法有效应对路面变化, 导致轨迹跟踪不够平滑。两位操作者的 Preview-LPV 控制效果较为一致, 在面对突发变化时能及时调整策略。在遥控平台下处理复杂路况和参数变化时, Preview-LPV 在轨迹跟踪方面展现出显著优势。综合两位操作者的实验结果, Preview-LPV 不仅能提供高精度的路径跟踪, 还能迅速应对环境变化, 确保车辆的稳定性与安全性。该策略为遥控平台下的轨迹跟踪提供了一种可靠的解决方案, 特别适用于要求高精度和高鲁棒性的应用场景。

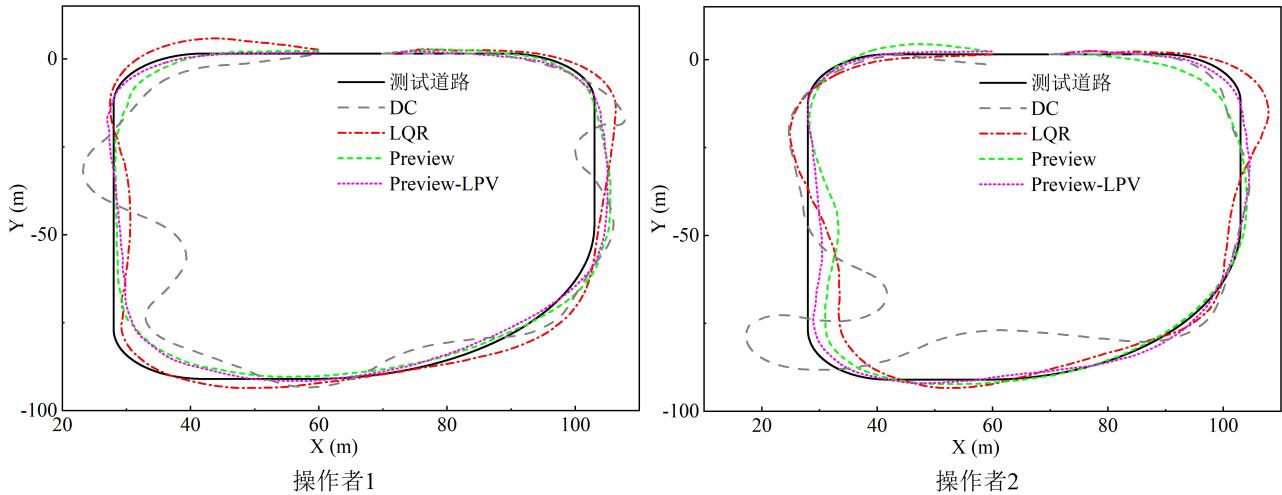


Figure 5 Target path and vehicle trajectory maps for Operator 1 and Operator 2

图 5 操作者 1 和操作者 2 的目标路径和车辆轨迹图

在对车辆控制系统性能进行定量分析时, $D2C$ 和 $H2C$ 这两个指标对于评估不同控制策略的有效性和稳定性至关重要。根据两位操作者的控制状态图 6-7 和图 8 中的数据, DC 方法在横向误差累积和航向误差累积方面表现最差。两位操作者的 $D2C$ 值分别为 985m^2 和 1091m^2 , $H2C$ 值分别为 $77.99\text{ rad}\cdot\text{m}$ 和 $72.34\text{ rad}\cdot\text{m}$ 。LQR 表现次之, 两位操作者的 $D2C$ 值分别为 509m^2 和 611m^2 , $H2C$ 值为 $42.58\text{ rad}\cdot\text{m}$ 和 $46.16\text{ rad}\cdot\text{m}$, 明显高于其他两种使用 PTGC 的控制策略。这表明 LQR 在长时间误差累积和航向控制稳定性上存在不足, 尤其在复杂路况中无法提供最佳控制效果。

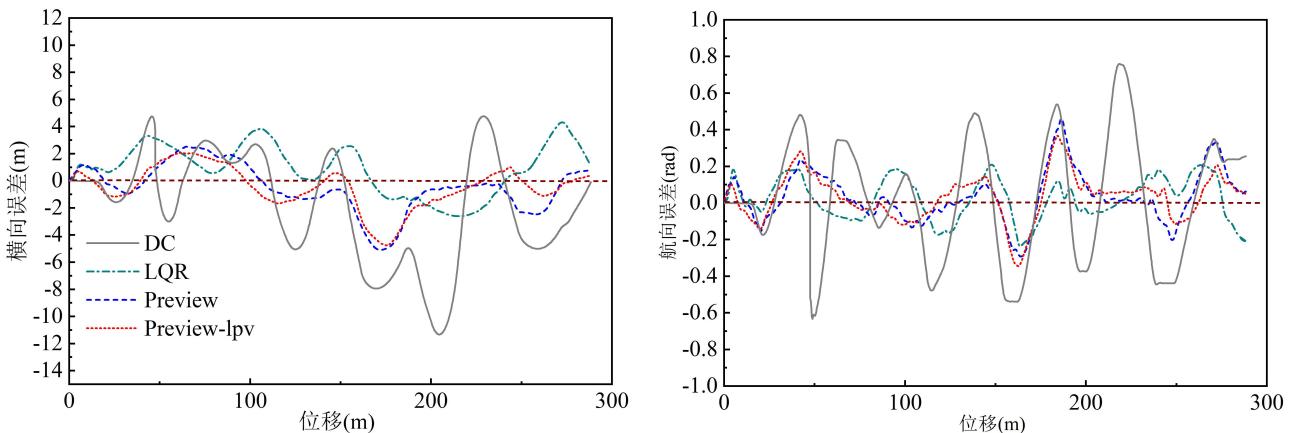


Figure 6. Lateral error and heading error vs. displacement for operator 1

图 6. 操作者 1 的横向误差和航向误差随位移变化图

相比之下, Preview 控制器的表现有了显著提升, 两位操作者的 $D2C$ 值为 402m^2 和 482m^2 , $H2C$ 值为 $30.24\text{rad}\cdot\text{m}$ 和 $33.55\text{rad}\cdot\text{m}$, 显示了在控制精度和稳定性方面的优势, 能够更有效地减少误差累积。而 Preview-LPV 的表现最为出色, $D2C$ 值为 347m^2 和 253m^2 , $H2C$ 值为 $24.13\text{rad}\cdot\text{m}$ 和 $29.46\text{rad}\cdot\text{m}$, 说明其在误差累积和航向控制方面的精度最高, 稳定性最好。

综合来看, Preview-LPV 在复杂或动态变化的驾驶条件下展现了更强的适应性和鲁棒性, 显著提高了车辆的轨迹跟踪能力和控制稳定性, 使其成为三种控制策略中的最佳选择。

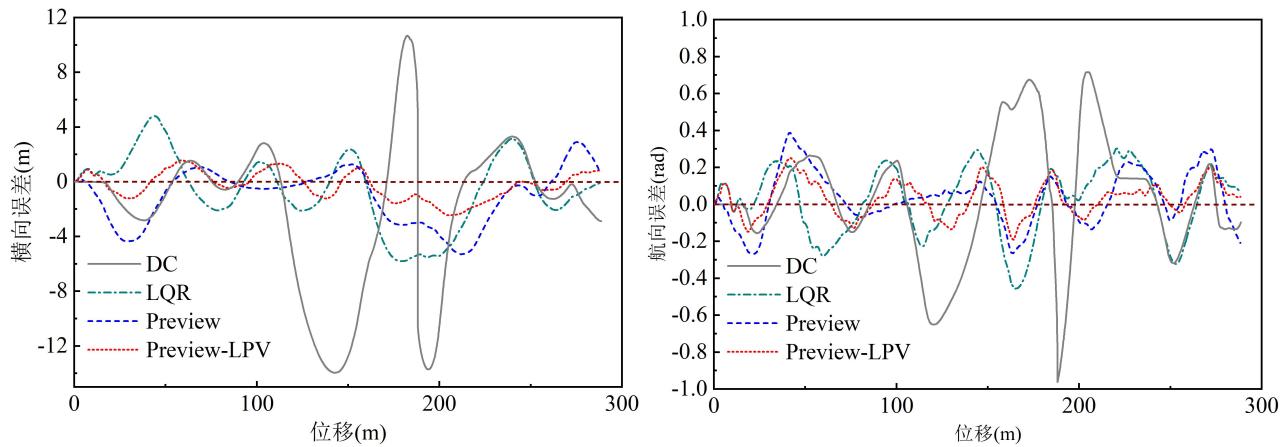


Figure 7. Lateral error and heading error vs. displacement for operator 2

图. 7 操作者 2 的横向误差和航向误差随位移变化图

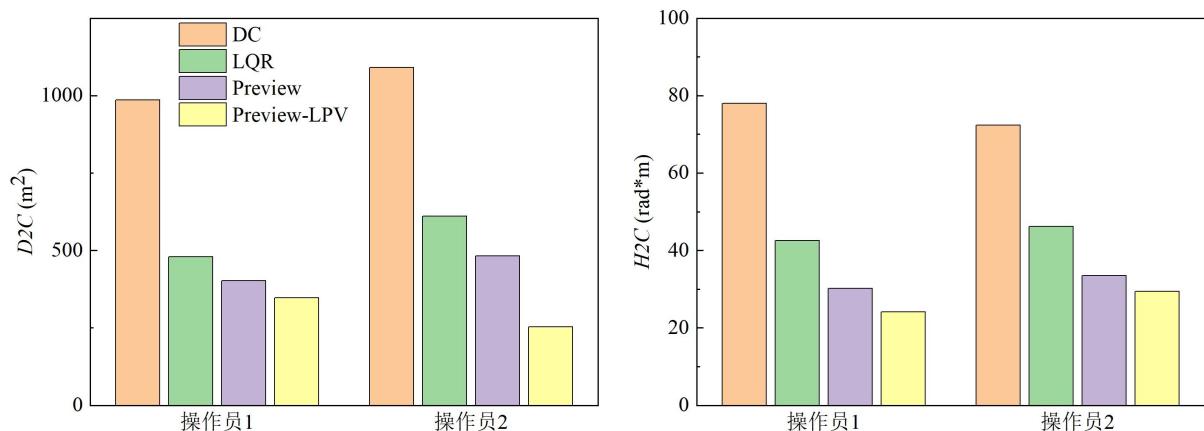


Figure 8 D2C and H2C indicators for operators

图 8 操作者 D2C 和 H2C 指标

5 结论

本文介绍并评估了用于 TGVs 的 PTGC 框架内的增强型 Preview-LPV 控制器。Preview-LPV 控制器的优势在于它结合了前馈增益补偿和路况自适应调整，确保了对延迟和环境不确定性的鲁棒性。通过人在环仿真平台实验结果表明 Preview-LPV 控制器相比 LQR 和 Preview 控制器在复杂工况下展现了更优的路径跟踪能力，尤其在道路摩擦系数变化时表现突出。Preview-LPV 控制器在处理道路摩擦系数变化等复杂工况时，能够实现更精确稳定的路径跟踪，两位操作者的 D2C 和 H2C 分别为 253m^2 、 $24.13\text{rad}\cdot\text{m}$ 和 347m^2 、 $29.46\text{rad}\cdot\text{m}$ 。操作者使用 Preview-LPV 效果较 LQR 的 D2C 分别提升了 50.2% 和 43.2%；H2C 分别提升了 43.3% 和 36.2%。Preview-LPV 较 Preview 的 D2C 分别提升了 37.1% 和 28.0%；H2C 分别提升了 20.2% 和 12.2%。结果表明在 PTGC 下 Preview-LPV 较 Preview、LQR 的控制更精确，面对突变路面的稳定性有较明显的提升，显示了优异的控制效果。综上所述，Preview-LPV 控制器在理论与实践中均展现出其有效性。该控制器不仅能提供高效稳定的路径跟踪，还能在不确定的遥控环境下保持较好的鲁棒性，为遥控车辆的控制策略开发提供了新的思路，也为该领域研究人员提供了宝贵经验。

参考文献 (References)

- [1] K. Darvish *et al.*, “Teleoperation of Humanoid Robots: A Survey,” *IEEE Trans. Robot.*, vol. 39, no. 3, pp. 1706–1727, 2023, doi: 10.1109/TRO.2023.3236952.
- [2] L. Zhao *et al.*, “Remote Driving of Road Vehicles: A Survey of Driving Feedback, Latency, Support Control, and Real Applications,” *IEEE Trans. Intell. Veh.*, no. December 2023, pp. 1–22, 2024, doi: 10.1109/TIV.2024.3362597.
- [3] Y. Zheng, M. J. Brudnak, P. Jayakumar, J. L. Stein, and T. Ersal, “A Delay Compensation Framework for Predicting Heading in Teleoperated Ground Vehicles,” *IEEE/ASME Trans. Mechatronics*, vol. 24, no. 5, pp. 2365–2376, Oct. 2019, doi: 10.1109/TMECH.2019.2936313.
- [4] A. Schrank, F. Walocha, S. Brandenburg, and M. Oehl, “Human-centered design and evaluation of a workplace for the remote assistance of highly automated vehicles,” *Cogn. Technol. Work*, vol. 26, no. 2, pp. 183–206, 2024, doi: 10.1007/s10111-024-00753-x.
- [5] J. Prakash, M. Vignati, and E. Sabbioni, “Performance of Successive Reference Pose Tracking vs Smith Predictor Approach for Direct Vehicle Teleoperation Under Variable Network Delays,” *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 73, no. 4, pp. 4636–4645, 2024, doi: 10.1109/TVT.2023.3339877.
- [6] H. Parr, C. Harvey, G. Burnett, and S. Sharples, “Investigating levels of remote operation in high-level on-road autonomous vehicles using operator sequence diagrams,” *Cogn. Technol. Work*, vol. 26, no. 2, pp. 207–223, 2024, doi: 10.1007/s10111-024-00762-w.
- [7] S. B. Kamtam, Q. Lu, F. Bouali, O. C. L. Haas, and S. Birrell, “Network Latency in Teleoperation of Connected and Autonomous Vehicles: A Review of Trends, Challenges, and Mitigation Strategies,” *Sensors*, vol. 24, no. 12, p. 3957, 2024, [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/2834876>
- [8] A. Matheson *et al.*, “The effects of predictive displays on performance in driving tasks with multi-second latency: Aiding tele-operation of lunar rovers,” *Proc. Hum. Factors Ergon. Soc.*, pp. 21–25, 2013, doi: 10.1177/1541931213571007.
- [9] H. Baier and G. Schmidt, “Transparency and stability of bilateral kinesthetic teleoperation with time-delayed communication,” *J. Intell. Robot. Syst. Theory Appl.*, vol. 40, no. 1, pp. 1–22, 2004, doi: 10.1023/B:JINT.0000034338.53641.d0.
- [10] R. Masaki, M. Kobayashi, and N. Motoi, “Remote-Controlled Method with Force and Visual Assists Based on Time to Collision for Mobile Robot,” *Appl. Sci.*, vol. 12, no. 8, 2022, doi: 10.3390/app12083727.
- [11] S. Lichiardopol, “A Survey on Teleoperation,” *Tech. Univ. Eindhoven*, vol. 2007.155, no. 2007, p. 35, 2007.
- [12] Q. Zhang, Z. Xu, Y. Wang, L. Yang, X. Song, and Z. Huang, “Predicted Trajectory Guidance Control Framework of Teleoperated Ground Vehicles Compensating for Delays,” *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 72, no. 9, pp. 11264–11274, 2023, doi: 10.1109/TVT.2023.3269517.
- [13] Q. Zhang, L. Yang, Z. Huang, and X. Song, “A Delay Compensation Framework Based on Eye-Movement for Teleoperated Ground Vehicles,” *IEEE Trans. Veh. Technol.*, pp. 1–11, 2024, doi: 10.1109/TVT.2024.3459865.
- [14] S. Thrun *et al.*, “Stanley: The robot that won the DARPA Grand Challenge,” *J. F. Robot.*, vol. 23, no. 9, pp. 661–692, Sep. 2006, doi: 10.1002/rob.20147.
- [15] S. Xu and H. Peng, “Design, Analysis, and Experiments of Preview Path Tracking Control for Autonomous Vehicles,” *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.*, vol. 21, no. 1, pp. 48–58, 2020, doi: 10.1109/TITS.2019.2892926.
- [16] P. Hang and X. Chen, “Path tracking control of 4-wheel-steering autonomous ground vehicles based on linear parameter-varying system with experimental verification,” *Proc. Inst. Mech. Eng. Part I J. Syst. Control Eng.*, vol. 235, no. 3, pp. 411–423, 2021, doi: 10.1177/0959651820934572.