

欠驱动自行车机器人视觉误差级联平滑与安全约束循迹控制

关皓轩, 段雨薇, 李思奇

(北华航天工业学院电子与控制工程学院, 河北 廊坊 065000)

摘要:针对欠驱动自行车机器人单目摄像头视觉车道线识别循迹过程中横向偏差信号易受阴影变化、车道线短时缺失和检测噪声影响,同时可能通过转向执行引发姿态振荡,导致机器人车体失衡,本文提出一种视觉误差级联平滑与安全约束循迹控制方法。该方法不改变既有车道线识别与底层平衡控制结构,而在二者之间构建视觉识别与执行接口层:首先,利用短时滑动平均抑制高频随机噪声,随后通过相邻差值约束削弱大幅突变,并结合输出饱和和限制转向指令幅值;同时,采用高速 UART 实现平滑指令的实时下发。实车在室外 400 m 跑道开展直道及左右弯道闭环测试。实车实验结果表明,该方法可在 STM32 平台上实现实时处理,在直道、左转和右转场景下分别将横向 RMSE 降低 40.2%、39.85%和 32.35%。

关键词: 自行车机器人; 视觉识别; 级联滤波; 平衡控制; 抗扰动

基金项目: 北华航天工业学院创新资助项目“无人驾驶自行车的自主平衡控制与循迹技术研究”(YKY-2025-13); 河北省高等学校科学技术项目“具备感知行为的机器人诊疗康复交互演化机理研究”(QN2024181)

DOI: <https://doi.org/10.68249/jstnei.2026.0015>

1 引言

欠驱动自行车机器人具有静不稳定、非完整约束和横向姿态—转向强耦合等特性^[1-3]。与四轮移动机器人不同,其视觉循迹误差并非仅影响路径跟踪精度,还会通过前轮转向和底层平衡控制链改变车体横滚状态。因此,视觉检测结果中的短时噪声、突变或中断若直接作为控制参考,容易造成转向指令跳变,并进一步放大为机械执行端的瞬态扰动^[4-6]。

已有工作分别从两个方向解决了该系统的关键问题:一类方法针对室外车道线识别,利用改进 Hough 变换、近场滑动窗口和多场景路径重构提高横向偏差估计的连续性^{[7][8]};另一类方法通过反作用飞轮和三级级联 PID 实现车体动态平衡。上述研究分别对应感知层和底层控制层,但视觉输出与机械执行之间仍需要一个具有抗突变能力的接口层,以避免残余视觉噪声直接进入控制器^[9]。

基于此,本文聚焦“视觉感知—控制执行”之间的误差映射问题,提出视觉误差级联平滑与安全约束方法。主要工作包括:构建视觉误差向执行指令传播的接口模型;采用滑动平均与相邻差值约束组成双级时序平滑机制;引入输出饱和与硬实时通信约束,限制大幅转向并保证指令及时下发;通过室外实车闭环实验验证方法在直道和双向弯道中的系统级有效性。

2 视觉误差传播与控制耦合分析

本文沿用既有单目视觉循迹与反作用飞轮平衡控制平台。前端视觉模块输出道路中心横向偏差,行为/转向层据此生成前轮转向参考,IMU 与编码器分别提供车体姿态和飞轮转速反馈,底层三级级联 PID 维持横向动态平衡。本文不重新讨论车道线提取算法和三级 PID 参数设计,而将研究对象限定为视觉偏差信号进入执行层前的接口处理。

$$E_x(k) = X_{center}(k) - X_{control}(k)$$

式中, $E_x(k)$ 为第 k 帧横向视觉偏差, $X_{center}(k)$ 为估计道路中心, $X_{control}(k)$ 为图像参考中心。若 $E_x(k)$ 含有高频抖动,前轮转向指令将产生连续反向修正;若车道线遮挡或重构切换导致偏差突增,则大幅转向会在短时间内改变横向运动状态,对静不稳定自行车的平衡控制形成额外扰动。因此,接口层需要同时处理“小幅高频噪声”和“大幅低频突变”两类异常。

作者简介: 关皓轩(2002—),男,硕士研究生,研究方向为控制工程;

段雨薇(2005—),女,学士,研究方向为控制工程;

李思奇(1984—),女,讲师,硕士生导师,研究方向为控制工程。

通讯作者: 关皓轩,邮箱: hoshine@stumail.nciae.edu.cn



图1 视觉误差抗扰动映射链路（接口层）

因此，本文在视觉感知模块与底层执行机构之间引入误差调理环节，对视觉横向偏差进行时序平滑和变化率约束。该方法不改变原有车道识别算法和底层平衡控制器结构，而是通过限制异常视觉输入向执行端传播，提高视觉感知与姿态控制之间的协调性。其基本信号传递关系可表示为：

$$E_x(k) \rightarrow \overline{E_x}(k) \rightarrow X_{send}^{smooth} \rightarrow u(k)$$

其中， $E_x(k)$ 为视觉模块输出的原始横向偏差， $\overline{E_x}(k)$ 为平滑后的视觉偏差， X_{send}^{smooth} 为经变化约束后的控制偏差， $u(k)$ 为最终转向参考量。

3 视觉误差级联平滑与安全约束方法

3.1 短时滑动平均：高频噪声抑制

由于非结构化环境的残余光照干扰，前端输出的偏差信号仍可能存在局部高频跳变，若直接将其作为控制器的设定值，极易诱发执行机构（舵机与反作用轮）的剧烈抖动，进而破坏系统的瞬态平衡。为此，本文设计了滑动平均与差值约束双层级联滤波算法。视觉偏差容易受到图像噪声、光照变化及边界检测误差的影响，存在 $\pm 5 \sim \pm 10$ 像素的高频随机噪声。滑动平均滤波通过对连续 N 个偏差值求取均值，可有效抑制此类噪声，其数学原理为：

$$\overline{E_x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N E_{x,i}$$

其中， $\overline{E_x}$ 为视觉识别误差值的平均值， $E_{x,i}$ 为对连续 N 帧偏差值， N 为滑动窗口长度（取10）。该处理降低单帧异常值对转向指令的影响，同时保持较低的计算复杂度，适用于资源受限的实时控制链路。

该方法利用短时间窗口内视觉信息的连续性削弱单帧异常值影响，在不明显增加计算量的情况下提高偏差信号稳定性。考虑嵌入式平台的实时性要求，本文采用较短的数据窗口进行处理，使滤波过程在抑制随机扰动的同时避免引入过大的响应延迟。

3.2 相邻差值约束：大幅突变抑制

滑动平均能够有效削弱连续帧中的小幅随机噪声，但在车道线突然受到遮挡、局部识别失败或机器人短时偏离路径时，视觉偏差仍可能出现较大的阶跃变化。此时若控制器直接采用新的偏差值，可能导致前轮转向量瞬间增大，影响车体横向平衡。

针对这一问题，本文在滑动平均基础上进一步设置相邻偏差变化阈值 $Z=30$ 。当当前偏差与历史控制偏差之间的变化量处于允许范围内时，系统正常更新控制输入；当变化量超过阈值时，对当前偏差进行约束和平滑修正，并利用当前平滑值 X_{send} 与历史基准 $X_{send,old}$ 进行二次约束。使控制参考逐步向新的目标值变化。该策略实质上限制了视觉误差向转向执行端的瞬时变化速度，使由遮挡、误检等因素产生的大幅偏差不会直接转化为突变控制指令。其离散逻辑如下式：

$$X_{send}^{smooth} = \begin{cases} \frac{X_{max}}{2}, |X_{min}| \leq Z \\ X_{send,old} - \left(\frac{X_{max}}{2}\right), |X_{send,old}| \geq |X_{send}| \\ X_{send,old} + \left(\frac{X_{max}}{2}\right), |X_{send,old}| < |X_{send}| \end{cases} \left\{ |X_{min}| > Z \right.$$

其中, X_{send}^{smooth} 为差值约束后的最终偏差指令。该策略利用历史执行状态限制当前突变量,使转向变化由突跃式调整转化为渐进式调整,从而降低视觉异常直接诱发大幅机械动作的概率。

3.3 输出限幅与硬实时执行

在完成两级滤波视觉误差平滑后,仍需考虑自行车机器人转向机构的物理工作范围,过大的控制指令可能导致前轮短时间产生较大转角,使横滚状态发生快速变化,导致机器人车体失去平衡。因此,本文进一步对最终控制偏差进行安全限幅,将输出约束在允许的控制区间内,避免异常视觉输入造成过大的执行器动作,差值约束后的指令进行饱和映射:

$$u(k) = \text{sat}(X_s(k), -30, 30)$$

当 $u(k) < 0$ 时,车体执行左向修正; $u(k) > 0$ 时,车体执行右向修正; $u(k) = 0$ 时,车体保持中位行进。

通讯接口输出采用 16 位有符号数据并通过 115200 bps UART 发送至底层执行器,按数据长度与波特率估算,估算公式如下所示:

单

$$\text{传输耗时}(ms) = \frac{\text{数据长度(字节)} \times 8}{\text{波特率}(bps)} \times 1000$$

次指令有效数据传输时间约为 0.14 ms,可满足机器人循迹实时视觉识别的高频状态刷新需求。

整体方法通过滑动平均、差值约束与安全限幅的三级级联处理,对机器人视觉识别产生的随机噪声和异常跳变在进入执行机构前得到逐级抑制,从而降低视觉误差直接作用于机械系统所带来的转向抖动风险,降低了车体失控风险。

4 实验与结果分析

4.1 实验平台与评价指标

实验在自行车机器人实物平台及室外跑道环境中进行。系统以 STM32F407 为主控制器,配置单目摄像头、IMU、编码器、无刷电机及前轮转向舵机。摄像头负责获取道路视觉信息,IMU 实时测量车体姿态,编码器反馈电机运行状态,主控制器完成视觉误差处理、控制指令计算及执行机构调度。原始实验环境包含直线段与固定曲率弯道,并存在动态阴影、局部过曝及道路标识干扰等实际视觉条件。

为评价系统循迹性能,采用横向偏差均方根误差 (RMSE) 作为主要指标:本文采用横向循迹均方根误差评价闭环跟踪精度:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n E_{x,i}^2}$$

其中, M 为采样帧数。

$RMSE$ 对较大的瞬时偏差具有较高敏感性,可同时反映机器人循迹精度及偏差波动程度,因此适用于评价视觉异常条件下的路径跟踪稳定性。 $RMSE$ 越小,说明横向偏差整体波动越小。需要说明的是,现有对比同时包含前端视觉增强与本文接口层策略的共同作用,因此本节结果用于证明完整闭环系统的工程有效性,不将全部性能增益单独归因于级联平滑模块。

4.2 直道动态响应

首先,在直道场景下对系统动态循迹性能进行验证,取直线循迹中的 300 帧进行数据处理,传统方案在光照变化、道路特征缺失等干扰出现时,横向偏差存在明显波动,部分测试过程中出现较大的瞬时偏移;采用改进级联算法后,动态响应曲线整体更加平稳,大幅度偏差出现频率降低,表明视觉误差处理能够减弱异常感知

结果对转向控制过程的影响。

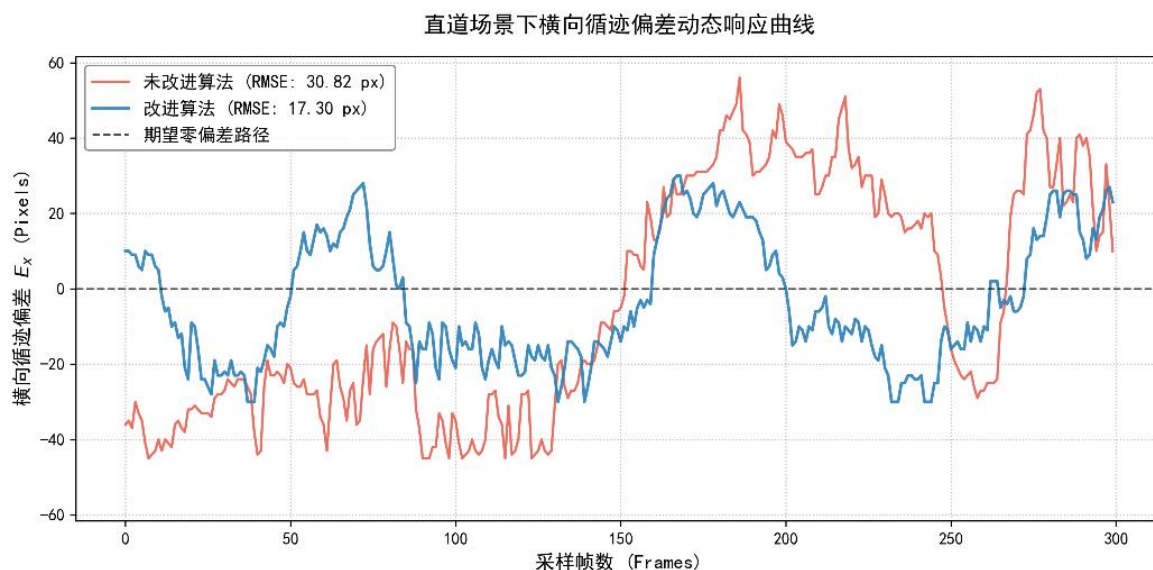


图2 直道场景下横向循迹偏差动态响应

在进行三次重复实验后,改进算法均能够完成直道循迹,其横向 $RMSE$ 分别为 16.80、17.30 和 17.52pixel,平均值为 17.41pixel;传统方案有效测试的平均 $RMSE$ 为 29.15pixel,系统级平均误差降低约 40.2%。该结果说明,采用视觉误差平滑及安全约束后,系统能够在视觉扰动存在时保持较稳定的横向偏差输出。

4.3 双向弯道系统级验证

为进一步分析自行车机器人在连续转向条件下的适应能力,分别开展左转和右转弯道实验,同时分别取 300 帧进行数据处理,与直道相比,弯道场景中道路边界在图像中的位置变化更快,视觉偏差具有更明显的动态变化,因此对控制指令连续性提出了更高要求。在左转车道实验中,传统算法中的平均 $RMSE$ 为 34.36pixel,而改进算法中的平均 $RMSE$ 降至 19.08pixel,相比之下,该算法在左转中平均 $RMSE$ 降低约 39.85%;在右转弯道实验下,传统算法中的平均 $RMSE$ 为 31.04pixel,而改进算法的平均 $RMSE$ 为 21.27pixel,相比之下,该算法在右转中平均 $RMSE$ 降低约 32.35%。两种弯道工况实验下均表现出误差波动大幅减小的趋势,说明该级联滤波能够适应弯道变化引起的连续视觉偏差变化,并保持较平稳的视觉输出与控制输入。

工况	基线 $RMSE$ / pixel	改进系统 $RMSE$ / pixel	平均降低幅度
直道	29.15	17.41	40.2%
左转弯道	34.36	19.08	39.85%
右转弯道	31.04	21.27	32.35%

表1 不同道路工况下的系统级 $RMSE$ 对比

综合直道与双向弯道实验可以看出,改进系统在三类典型道路工况下均表现出大幅降低横向循迹的平均 $RMSE$,并能够降低视觉扰动条件下的偏差波动。

5 结论

针对欠驱动自行车机器人视觉循迹中偏差信号易跳变并向机械执行端传播的问题,本文提出视觉误差级联平滑与安全约束循迹控制方法。在既有车道感知和三级平衡控制结构之间增加接口层,通过 10 帧滑动平均抑制高频随机噪声,以 30 为差值阈值限制相邻指令突变,并将最终转向参考限制在 $[-30,30]$ 范围内,同时利用高速 UART 完成实时下发。室外跑道系统级实验表明,直道、左转和右转场景的平均 $RMSE$ 分别降低 40.2%、39.85%和 32.35%。该方法结构简单、计算开销低,可作为视觉感知与平衡执行之间的独立抗扰动接口,为欠驱动自行车机器人在复杂环境中的稳定循迹提供工程实现路径。

参考文献:

- [1] Li S, Guan H, Ge J, et al. Mathematical Modeling and Vision-Guided Triple-Loop Control of an Underactuated Bicycle Robot[J]. Mathematics, 2026, 14(12): 2160.
- [2] Li J. PID Line-Tracking Vehicle Based on OpenCV with Object Recognition and Response Function[C]. AIP Conference Proceedings. 2024, 3144:050009.
- [3] Zhai S, et al. An algorithm for lane detection based on RIME optimization and optimal threshold[J]. Scientific Reports, 2024, 14(1):27244.
- [4] Meijaard J P, Papadopoulos J M, Ruina A, et al. Linearized dynamics equations for the balance and steer of a bicycle: a benchmark and review[J]. Proceedings of the Royal Society A, 2007, 463(2084): 1955-1982.
- [5] Åström K J, Klein R E, Lennartsson A. Bicycle dynamics and control: adapted bicycles for education and research[J]. IEEE Control Systems Magazine, 2005, 25(4): 26-47.
- [6] KARAPET B, SAVITSKYI R, VAKALIUK T. Method of comparing and transforming images obtained using UAV[J], Radioelectronic and Computer Systems, 2024(1):99.
- [7] Canny J. A computational approach to edge detection[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1986, 8(6): 679-698.
- [8] Duda R O, Hart P E. Use of the Hough transformation to detect lines and curves in pictures[J]. Communications of the ACM, 1972, 15(1): 11-15.
- [9] Bradski G. The OpenCV Library[J]. Dr. Dobbs's Journal of Software Tools, 2000, 25(11): 120-126.

Cascaded Visual-Error Smoothing and Safety-Constrained Path Tracking

Control for an Underactuated Bicycle Robot

Haoxuan Guan, Yuwei Duan, Siqi Li

School of Electronic and Control Engineering, North China Institute of Aerospace Engineering, Langfang 065000, China

Abstract: To address the problem that lateral deviation signals in monocular vision-based lane tracking of an underactuated bicycle robot are susceptible to shadow variations, temporary lane-line loss, and detection noise, and may further induce attitude oscillations through the steering actuation chain and consequently destabilize the robot body, this paper proposes a cascaded visual-error smoothing and safety-constrained path-tracking control method. Without modifying the existing lane-recognition algorithm or the underlying balance-control structure, a visual-perception-to-actuation interface layer is introduced between them. A short-window moving average is first employed to suppress high-frequency random noise, followed by an inter-sample difference constraint to attenuate large abrupt variations. Output saturation is further applied to limit the steering-command amplitude, while high-speed UART communication is used for real-time transmission of the smoothed commands. Closed-loop experiments were conducted on straight and left- and right-turn sections of an outdoor 400 m track. Experimental results show that the proposed method can be implemented in real time on an STM32 platform and reduces the lateral tracking RMSE by 40.2%, 39.85%, and 32.35% in straight, left-turn, and right-turn scenarios, respectively.

Keywords: bicycle robot; visual recognition; cascaded filtering; balance control; disturbance rejection