

基于模糊自适应整定 PID 控制的 机器人路径跟踪方法设计

赵慧敏

(石家庄市教育信息化管理中心, 石家庄 050000)

摘要: 常规机器人路径跟踪算法在机器人运动过程中无法实时调整 PID 控制器的参数, 导致机器人的路径跟踪性能较差; 为解决这一问题, 提出了机器人路径跟踪的模糊自适应整定 (PID) 算法设计; 首先构建机器人系统模型, 计算机器人的运动航向角, 并根据机器人测量系统利用基准坐标系中的离散坐标来描述机器人在运动过程中的曲面法向量; 然后结合转动离散惯性系数对路径特征点进行匹配; 基于此基础, 引入模糊自适应整定 PID 算法设计控制器, 通过优化控制器的内部参数, 调整控制器的增益输出, 从而实现机器人的路径跟踪; 实例应用结果表明, 该方法能够准确跟踪机器人的移动路径, 路径跟踪偏移较小, 路径偏移量始终维持在 0.5 个单位以下; 跟踪性能较好, 其 F_1 值更加接近于 1。

关键词: 模糊自适应整定 PID; 机器人; 路径跟踪; 期望路径; 跟踪偏移量; 离散惯性系数

Method for Robot Path Tracking Based on Fuzzy Adaptive Tuning PID Control

ZHAO Huimin

(Shijiazhuang Education Information Management Center, Shijiazhuang 050000, China)

Abstract: Conventional robot path tracking algorithms cannot adjust the parameters of Proportional Integral Derivative (PID) controller in real-time during robot motion, resulting in poor path tracking performance of robots. To solve this problem, a fuzzy adaptive tuning PID algorithm for robot path tracking is proposed. Firstly, construct the robot system model, calculate the robot's motion heading angle, and describe the surface normal vector of the robot during motion using discrete coordinates in the reference coordinate system based on the robot measurement system. Then, the path feature points are matched by combining the rotational discrete inertia coefficient. Based on this, the fuzzy adaptive tuning PID algorithm is introduced to design a controller. By optimizing the internal parameters of the controller and adjusting its gain output, the robot's path tracking is achieved. The application results of the example show that this method can accurately track the movement path of the robot, with a small path tracking offset and a path offset of below 0.5 units. It has a good tracking performance is good, and its F_1 value is closer to 1.

Keywords: fuzzy adaptive tuning PID; robots; path tracking; expected path; tracking offset; discrete inertia coefficient

0 引言

在当今快速发展的自动化和机器人技术领域, 机器人路径跟踪已成为一个关键的研究课题。随着智能制造、无人驾驶车辆、服务机器人等应用的不断扩展, 对机器人精确、高效、灵活地执行路径跟踪任务的需求日益增长。路径跟踪不仅涉及机器人在物理空间中的导航, 还关系到其在复杂环境中的自主决策和动态适应能力。传统的路径跟踪方法虽然在一定程度上能够满足基本的跟踪需求, 但在面对非线性、时变、不确定性和复杂环境干扰时, 其性能往往受限。

因此, 研究者们开始探索更先进的控制策略, 如模糊逻辑、自适应控制、神经网络和强化学习等, 以提高机器人的路径跟踪精度和鲁棒性。文献 [1] 中, 研究者采用了滑模控制 (SMC, sliding mode control) 算法来设计控制

器, 这种算法以其对系统参数不确定性和外部干扰的强鲁棒性而著称。通过滑模控制, 机器人能够更好地适应环境变化, 有效减小了随机延迟对控制精度的不利影响, 从而提高了路径跟踪的准确性。但在控制过程中容易受到环境干扰, 导致出现控制精度降低的问题。文献 [2] 则提出了一种结合模型预测控制 (MPC, model predictive control)、粒子群优化 (PSO, particle swarm optimization) 和反向传播 (BP, backpropagation) 神经网络的复合控制策略。MPC 算法通过预测未来系统状态来优化当前控制输入, 而 PSO 和 BP 神经网络的引入则旨在进一步优化控制参数, 提高路径跟踪的准确性。然而, 这种复合策略的成功实施在很大程度上依赖于 PSO 参数的精心选择, 这需要研究者具备深厚的理论基础和实践经验。文献 [3] 的研究则转向了深度强化学习 (DRL, deep reinforcement learning) 算法, 这是一种模仿人类学习过程的机器学习方法。通过训练智

收稿日期: 2024-06-28; 修回日期: 2024-07-23。

作者简介: 赵慧敏 (1973-), 男, 大学本科, 高级教师。

引用格式: 赵慧敏. 基于模糊自适应整定 PID 控制的机器人路径跟踪方法设计[J]. 计算机测量与控制, 2024, 32(12): 146-152.

能体在不同的控制模式之间进行智能切换, DRL 算法能够实现更为有效的路径规划和控制。这种方法的优势在于其自适应性和学习能力, 能够在复杂多变的环境中找到最优的控制策略。但可能缺乏对其他类型干扰的适应性, 且侧滑预测模型的准确性直接影响控制效果。文献 [4] 则提出了一种改进的跟踪控制器, 引入了模糊控制 (Fuzzy Control) 来处理系统中的不确定性。模糊控制器能够根据模糊逻辑规则对输入输出进行模糊推理, 从而在不确定环境下提供更为平滑和稳定的控制效果。然而, 模糊控制器的训练过程需要平衡训练时间和精度, 以确保控制器在实际应用中的性能, 但其训练过程需要权衡时间和精度, 以确保实际应用中的性能。文献 [5] 提出的基于种群的元启发式最优模糊控制器设计, 利用了元启发式算法 (如遗传算法、粒子群优化等) 的搜索能力, 能够在复杂的搜索空间中找到全局最优解。这种方法的优点在于其全局搜索能力和对模糊规则的自适应调整, 能够有效应对环境变化和不确定性; 然而, 元启发式算法的计算成本较高, 实时性可能受限, 且对初始参数设置敏感, 需要仔细调参。文献 [6] 介绍的轮式移动机器人反侧滑路径跟踪控制方法, 专注于解决轮式机器人在侧滑情况下的路径跟踪问题。该方法通过预测和补偿侧滑效应, 提高了路径跟踪的精确性和鲁棒性。优点在于其针对性强, 能够有效处理特定问题, 但可能缺乏对其他类型干扰的适应性, 且侧滑预测模型的准确性直接影响控制效果。文献 [7] 提出的爬墙机器人对钢箱自动检测的路径跟踪方法, 适用于特定环境下的任务, 如爬墙机器人在钢箱表面的检测任务。这种方法的优点在于其针对性强, 能够适应特定的工作环境和工作任务, 但可能缺乏通用性, 不适用于其他类型的机器人或环境。

常规机器人路径跟踪算法在机器人运动过程中不能够实时改变 PID (Proportional-Integral-Derivative) 控制器的参数, 使机器人具有的路径跟踪性能较差。为此, 提出机器人路径跟踪的模糊自适应整定 PID 算法设计。通过分析机器人路径跟踪的原理, 构建机器人系统模型, 并计算机器人的运动航向角, 根据机器人测量系统利用基准坐标系中的离散坐标对机器人在运动过程中的曲面法向量进行描述, 并结合转动离散惯性系数对路径特征点进行匹配, 基于此, 引入模糊自适应整定 PID 算法设计控制器, 并通过优化控制器的内部控制参数, 调整控制器的增益输出, 进而实现机器人路径跟踪。实例应用结果显示, 所提方法可以准确跟踪机器人的移动路径, 路径跟踪偏移量较小, 跟踪性能较好。针对上述方法存在的问题, 本文研究结合模糊自适应整定 PID 算法研究并设计了一种新型的机器人路径跟踪方法, 旨在提高机器人在复杂环境中的跟踪性能和适应性, 为实现更高效、更智能的机器人操作提供了新的解决方案。

1 机器人路径跟踪算法设计

1.1 机器人运动航向角计算

机器人运动航向角的计算旨在确定机器人当前的朝向

或方向角。通过计算航向角, 可以获得关于机器人在平面上的朝向信息。这对于机器人的导航、路径规划以及与环境进行交互非常重要。例如, 在自主导航中, 机器人需要知道自身的朝向以确定移动方向; 在避障任务中, 航向角可以用于判断机器人是否应该调整方向来避开障碍物。因此, 计算机器人的航向角对于实现准确的运动控制和决策具有关键性的作用。在路径跟踪过程中, 为了使机器人能够沿着预设的路径进行移动, 必须确保机器人的航向角与预定路径的方向保持一致, 若航向角出现偏差, 则会导致机器人偏离预设路径, 从而使得路径跟踪失败。因此, 为便于后续对机器人路径跟踪算法的设计, 首先计算机器人的运动航向角。

本文以型号为 BJ-470 的轮式机器人为例, 其机器人系统模型如图 1 所示。

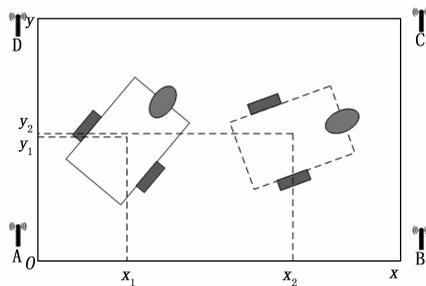


图 1 机器人系统模型

图 1 中, 以 A 基站为指标原点搭建基准坐标系, (x_i, y_i) 为机器人运动过程中质心的坐标。则根据 jar 的运动速度和驱动轮转速, 可获取机器人的位姿信息如下式所示:

$$P_T = \begin{bmatrix} v_0 \\ r_0 \\ \alpha_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ \theta_i \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中, v_0 为机器人平均运动速度, r_0 为驱动轮转速, α_0 为从动轮转速, θ_i 为位置角。

根据机器人的几何结构, 对于每个运动链, 其向量方程的表达式为:

$$B_f = P_T \sum c_0 * j_k \quad (2)$$

式中, c_0 为末端执行器长度, j_k 为转换系数。

由此可得到刚性机器人的逆运动学方程为:

$$Q_j = \arctan\left(\frac{B_f \times \varphi_0}{\sqrt{y_u \times p_g}}\right) \quad (3)$$

式中, φ_0 为执行器中心到关节之间的距离, y_u 为执行器的动能, p_g 为第 p 个圆柱体的角速度。

在机器人测量系统中, 利用基准坐标系中的离散坐标对机器人在运动过程中的曲面法向量进行描述, 表达式如下:

$$e_i = \frac{Q_j \cdot \omega_1}{\|\delta_k \cdot h_p\|^2} \quad (4)$$

式中, ω_1 为欧式范数, δ_k 为坐标向量, h_p 为归一化距离参数。

基于上式, 可计算出导航点 a 到导航点 b 过程中的航向

角为:

$$\beta_{ob} = \arccos \frac{e_i(d_m + m^2)}{2\lambda_k} \quad (5)$$

式中, d_m 为两个导航点之间的距离, m 为机器人整机质量, λ_k 为质量惯性矩阵。

通过分析机器人路径跟踪的原理, 求取机器人运动过程中的位姿信息, 结合机器人系统模型计算其运动航向角, 为接下来移动路径特征点匹配提供数据基础。

1.2 机器人移动路径特征点匹配

机器人移动路径特征点匹配技术, 作为机器人导航和定位领域的核心技术之一, 其目的在于通过识别和精确匹配路径上的关键特征点, 实现对机器人位置和高精度估计与实时跟踪。这一过程首先涉及从机器人所经过的路径中提取出独特且稳定的特征点, 这些特征点通常具有良好的可重复性和区分度, 如角点、边缘或纹理等。随后, 通过将这些特征点与预先构建的地图或期望路径中的对应特征点进行匹配, 机器人能够准确地确定自身的当前位置和朝向。特征点匹配技术不仅能够实现精确的位置估计, 还能够在机器人的跟踪和导航过程中发挥重要作用。它帮助机器人感知周围环境的结构和特征, 从而在复杂多变的环境中实现有效的避障和智能路径规划。通过这种方式, 机器人能够根据实时获取的环境信息, 动态调整其运动轨迹, 确保安全、高效地完成任

务。根据轮式机器人的设计结果, 将其分成运动学与动力学两部分, 则机器人在遇到障碍物时的瞬时转弯半径可为:

$$r_s = \frac{d_e}{\beta_{ob} \times \omega_s} \quad (6)$$

式中, d_e 为驱动轮的等效直径, d_e 为机器人运动航向角, ω_s 为机器人当前的运动距离。

由此可得机器人的动力学模型, 表达式如下:

$$\bar{F} = g_s r_s \sum \frac{\alpha_p}{\varphi_k} \quad (7)$$

式中, g_s 为 s 维广义坐标变量, α_p 为运动特殊矢量域, φ_k 为光滑系数。

结合机器人的动力学模型, 可对机器人的分解角进行计算^[8], 公式如下:

$$\varphi_z = - \left\| \frac{\sum \frac{\bar{F} \times \chi_i}{b_x}}{\sqrt{E_x}} \right\| \quad (8)$$

式中, χ_i 为加速度合成值, b_x 为转向角, E_x 为正倒数矩阵。

为保证机器人的运动路径符合预设路径的目标, 设计机器人的空间状态表达式^[9], 即:

$$s(k) = \varphi_z \times \iota_0 / G_0 \quad (9)$$

式中, ι_0 为约束控制增量, G_0 为双曲正切函数。

将机器人的运动全过程控制在广义坐标的零空间内, 则此空间的约束条件为:

$$R_y = \frac{s(k)/j_p}{\sum \sum \frac{f_g}{k_i}} \quad (10)$$

式中, j_p 为采集的有效数据均值, f_g 为偏置参数, k_i 为采样函数。

进一步可求得机器人的水平自由度^[10-12], 表达式如下:

$$C_k = \exp\left(-\frac{u_{t+1}}{r_y \cdot R_y}\right) \quad (11)$$

式中, u_{t+1} 为机器人在 $t+1$ 时刻的位置, r_y 为随机矢量。

将机器人末端执行器的结构视为封闭的矢量多边形, 则其转动离散惯性系数可为:

$$c_u = \frac{C_k \times \rho_c}{\sum \lambda_i / W_o} \quad (12)$$

式中, ρ_c 为特定变量, λ_i 为具有对称性质的惯性矩阵, W_o 为多变量函数。

考虑到机器人的侧偏刚度是非线性的, 则可采用下式描述机器人运动的有界不确定性, 即:

$$H(t) = \frac{c_u}{\sqrt{\left\| \frac{Y_c}{V_b \cdot J_h} \right\|^2}} \quad (13)$$

式中, Y_c 为线性分数变换矩阵, V_b 为时变参数, J_h 为比例系数, $H(t)$ 为波动函数。

进而根据路径特征间的相似度完成路径特征点的匹配, 过程如下:

$$S_m = \sum_{i=1}^n |H(t) \times \eta_c|^{1/\beta_k} \quad (14)$$

式中, n 为路径特征点个数, η_c 为对比标准图谱, β_k 为雅可比矩阵。

根据机器人航向角, 分析机器人的空间状态, 结合转动离散惯性系数对路径特征点进行匹配, 便于最终实现机器人路径跟踪。

1.3 基于模糊自适应整定的机器人路径跟踪

1.3.1 机器人路径跟踪控制器

基于模糊自适应整定的机器人路径跟踪方法之所以能够同时展现出自适应性、鲁棒性、高精度、高稳定性、实时性以及适应复杂环境等多重优势, 是因为它巧妙地将模糊控制和自适应 PID 控制两大技术融合在一起。模糊控制赋予了系统强大的适应性和鲁棒性, 使其能够应对各种复杂环境和不确定性; 而自适应 PID 控制则确保了系统的稳定性和精度, 通过实时调整 PID 参数, 实现精准的路径跟踪。这一方法的综合应用, 使得机器人在实时性要求高的复杂环境下, 仍能保持稳定、精确的路径跟踪性能。在机器人路径跟踪过程中, 对机器人的控制目标应是保证运动路径与预设路径之间的拟合程度尽可能高, 并获得转向的稳定性, 在此基础上, 保证机器人的控制量变化的误差较小。因此, 本研究采用模糊自适应整定算法设计控制器, 并通过优化控制器的参数实现路径跟踪。模糊自适应整定控制器的结构如图 2 所示。

由图 2 可知, 在机器人导航系统中, 路径规划器 (Path Planner) 扮演着至关重要的角色, 它如同一位精明的策略家, 负责在复杂的环境中为机器人规划出一条安全、高效

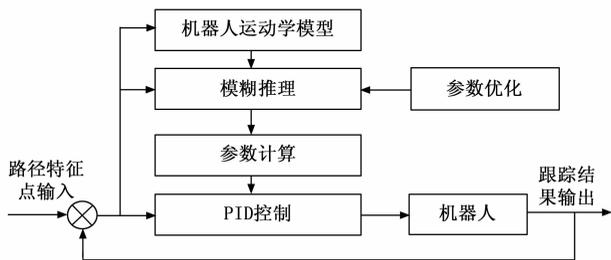


图 2 机器人路径跟踪控制器结构

的行进路线。这个规划器会综合考虑环境地图、障碍物分布、任务需求等因素，通过算法生成一条平滑且无碰撞的期望路径，为机器人的移动提供明确的方向。位置估计器 (Position Estimator) 则如同机器人的“第六感”，它通过整合来自多种传感器的数据，如激光雷达、摄像头、惯性测量单元等，实时估计机器人的当前位置和姿态。这一过程类似于人类通过视觉和平衡感来感知自身在空间中的位置，为机器人的精确导航提供了基础数据。控制算法 (Control Algorithm) 是机器人导航系统的大脑，它根据位置估计器提供的信息和路径规划器生成的期望路径，运用复杂的数学模型和算法，计算出精确的控制指令。这些指令旨在指导机器人的运动，使其能够紧密地跟随预定的路径，就像一位经验丰富的舵手，精准地操控着船只沿着既定航线前进。执行器 (Actuators) 是机器人身体的肌肉，它们接收来自控制器的指令，并将其转化为实际的运动。无论是轮式机器人的驱动轮，还是足式机器人的关节，执行器都将电信号转换为机械动作，驱动机器人按照控制指令移动。反馈环 (Feedback Loop) 是机器人导航系统中的关键环节，它确保了系统的闭环控制。通过不断收集机器人的真实状态信息，如位置、速度和姿态，反馈环将这些数据实时传递给控制器。控制器根据这些反馈信息调整控制指令，以纠正任何可能出现的跟踪误差，确保机器人能够精确地保持在期望路径上，就像一位细心的园丁，不断修剪枝叶，使植物沿着理想的方向生长。

综上所述，路径规划器、位置估计器、控制算法、执行器和反馈环共同构成了一个高效协同的机器人导航系统。这个系统不仅使机器人能够在复杂环境中自主导航，还确保了机器人的运动既精确又可靠，为机器人在各种应用场景中的成功部署提供了坚实的技术支持^[13-15]。

基于模糊自适应整定 PID 控制的机器人路径跟踪方法，是一种结合了模糊逻辑和传统 PID 控制策略的先进控制技术。在这种方法中，PID 控制器的参数 (比例增益 K_p 、积分增益 K_i 和微分增益 K_d) 不是固定不变的，而是通过模糊逻辑系统根据系统的实时状态进行动态调整，以优化控制性能。模糊自适应 PID 控制器的基本结构包括一个传统的 PID 控制器和一个模糊逻辑系统。模糊逻辑系统根据误差 $e(t)$ 及其变化率 $\dot{e}(t)$ 来调整 PID 参数。模糊逻辑系统的输入通常是误差 $e(t)$ 和误差变化率 $\dot{e}(t)$ ，输出则是 PID 参数的调整量 ΔK_p 、

ΔK_i 和 ΔK_d 。模糊逻辑系统的输出可以表示为：

$$\Delta K_p = F_p[e(t), \dot{e}(t)] \quad (15)$$

$$\Delta K_i = F_i[e(t), \dot{e}(t)] \quad (16)$$

$$\Delta K_d = F_d[e(t), \dot{e}(t)] \quad (17)$$

其中： $e(t)$ 、 F_i 和 F_d 是模糊逻辑推理函数，它们根据模糊规则库和模糊推理机制来确定。模糊逻辑推理函数是一种强大的工具，用于处理和解决涉及不确定性和模糊性的问题。其实现过程首先涉及定义模糊变量和隶属函数，这为输入和输出变量提供了模糊集及其隶属度描述。接着，根据专家知识或经验构建模糊规则库，这些规则以“如果—那么”的形式表达，指导系统在不同条件下的行为。然后，通过模糊化输入变量，将实际值转换为模糊值，以便与规则库中的条件进行匹配。在应用模糊推理机制时，系统使用 Mamdani 或 Takagi-Sugeno 方法，根据输入的模糊值和规则库推导出输出的模糊集。最后，通过去模糊化过程，将模糊输出转换为具体的数值，以便于实际应用。整个过程通过编程语言实现，确保了模糊逻辑推理函数在复杂系统控制和决策中的有效性和实用性。

PID 控制器的更新公式为：

$$K_p(t+1) = K_p(t) + \Delta K_p \quad (18)$$

$$K_i(t+1) = K_i(t) + \Delta K_i \quad (19)$$

$$K_d(t+1) = K_d(t) + \Delta K_d \quad (20)$$

最终，PID 控制器的输出 $u(t)$ 根据更新后的参数计算：

$$u(t) = K_p(t)e(t) + K_i(t) \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d(t) \frac{de(t)}{dt} \quad (21)$$

通过这种方式，模糊自适应 PID 控制器能够根据机器人的实时路径跟踪误差和误差变化率，动态调整 PID 参数，从而实现更加精确和鲁棒的路径跟踪控制。

1.3.2 输出最优控制信号

依据机器人的运动学模型，对机器人的运行参数进行模糊推理，并结合处理规则库中的先验知识优化控制器的控制参数，计算公式如下：

$$U_k = \bar{u}(t) \times \lambda_n \times \bar{w}_g \quad (22)$$

式中， λ_n 为参考输出值， \bar{w}_g 为实际输出值。

将路径特征点匹配结果输入至控制器中，求取控制器的控制曲率与趋近律，即：

$$\begin{cases} \zeta_1 = U_k / S_{im} \cdot q_p \\ \zeta_2 = \zeta_1 \cdot X_k \end{cases} \quad (23)$$

式中， S_{im} 为路径特征点匹配结果， q_p 为比例积分系数， X_k 为微分控制系数， ζ_1 、 ζ_2 分别为控制器的控制曲率和趋近律。

通过不断自学习调整控制器的增益输出，以优化机器人的路径跟踪性能。自学习过程涉及对控制器内部参数的持续优化。通过实时监测机器人的路径跟踪误差及其变化率，控制器能够智能地调整这些参数，以确保机器人在执行任务时能够沿着预定路径精确移动^[16-20]，从而得到机器人的路径跟踪结果如下：

$$A_y = \frac{\zeta_2 \times P_\eta}{1 + L_c} \sum \psi_i \quad (24)$$

式中, P_{η} 为路径跟踪概率, \bar{L}_c 为增益系数, ψ_i 为当前状态值函数估计。

基于路径特征点匹配结果, 采用模糊自适应整定算法设计控制器, 并通过优化控制器的内部控制参数, 调整控制器的增益输出, 模糊自适应整定算法的核心在于其能够根据系统的实时反馈, 动态调整 PID 控制器的参数。具体而言, 比例增益、积分增益和微分增益直接影响系统的响应速度、稳定性和抗干扰能力。通过模糊逻辑, 算法能够根据路径跟踪的实时误差和误差变化率, 智能地调整这些参数, 以确保控制器输出最优的控制信号^[15]。

2 实例论证分析

为验证本文设计的基于模糊自适应整定 PID 的机器人路径跟踪算法在实际应用中的效果, 在上述理论设计的基础上, 以轮式工业机器人为研究对象, 设计对比实验, 通过对机器人进行路径跟踪控制分析该方法的控制效果。

2.1 实验准备

由于 BJ-470 的轮式机器人结构简单且灵活、成本效益高、应用潜力广泛以及易于集成新技术的特点。这类机器人不仅为研究和开发新算法、控制策略和导航技术提供了理想的平台, 而且其模块化设计也便于快速原型设计和实验新想法。本次实验以 BJ-470 的轮式机器人为研究案例, 采用 Matlab 软件对该机器人的运动路径进行仿真。该机器人的基本设计参数如表 1 所示。

表 1 机器人基本设计参数

参数	数值
尺寸(长×宽×高)/mm ³	800×600×300
重量	10 kg
驱动方式	四轮驱动
电池类型	锂电池
精度	±2 cm
最大速度/(m/s)	2
最大加速度/(m/s ²)	2
负载能力/kg	50
续航时间/min	120
末端执行器质量/kg	1.0
执行器边长/cm	15

在设计基于模糊自适应整定 PID 控制的机器人路径跟踪方法时, 轮式机器人因其独特的结构和运动特性而成为理想选择。这些特性包括高度的灵活性和机动性, 得益于全向或非全向轮的设计, 使得机器人在复杂环境中能够自由移动; 精确的速度和加速度控制, 通过调节轮子转速实现, 为 PID 控制提供了直接的控制接口; 稳定的结构设计, 确保在运动中保持平衡, 减少路径跟踪误差; 高效的能耗表现, 在平坦地面上滚动摩擦小, 适合长时间任务; 简单的控制系统, 仅需控制轮子的转速和转向, 便于模糊自适应整定 PID 控制器的应用; 以及良好的环境适应性, 特别适合室内或维护良好的室外环境。通过充分利用这些特点,

结合模糊自适应整定 PID 控制器的实时调整能力, 可以显著提升轮式机器人在路径跟踪任务中的性能, 实现精确、高效且稳定的路径跟踪。

设置机器人的标定参数为 $g_p=0.3$ m, 期望跟踪速度为 $v_d=0.5$ m/s。假设机器人所带的负载质量为 18.5 kg, 其转动惯量为 2.5 kg·m², 且负载的质心在机器人质心正上方 2.0 cm 处。

在本实验中, 构建一个封闭的室内环境, 该空间尺寸为 10 m×10 m, 为机器人提供了一个受控且边界明确的测试场地。预设的路径是一条长度为 10 m 的不规则曲线, 旨在评估机器人的路径跟踪能力。实验开始时, 机器人被精确地放置在起始位置, 其姿态和朝向均经过校准, 以确保实验的准确性。随后, 在计算机上启动了 PID 控制器算法, 该算法是基于比例、积分和微分 3 个控制环节的闭环控制系统, 能够根据误差信号实时调整控制输出。PID 控制器通过与机器人控制器建立通信, 发送一系列精心计算的控制指令, 指导机器人开始其移动任务。在机器人移动过程中, 安装在其上的激光雷达持续工作, 对周围环境进行 360 度扫描, 实时获取环境的三维点云数据。这些数据被用来构建环境地图, 并用于实时障碍物检测和避免。同时, 激光雷达的数据也被用于辅助 PID 控制器进行精确的位置和姿态估计, 确保机器人能够准确跟踪预设路径。随着机器人沿着预定路径移动, PID 控制器不断地根据反馈信息调整控制命令, 以校正任何偏离预定路径的误差。这种动态调整机制使得机器人能够在复杂多变的环境中保持高精度的路径跟踪。当机器人成功完成路径跟踪任务, 准确到达预设路径的终点时, 计算机将停止发送控制命令, 机器人随之停止移动, 标志着实验的圆满结束。

2.2 实验说明

设定模糊自适应整定 PID 算法的输入变量为控制误差 $e(t)$ 、路径特征点匹配结果 S_{im} 和误差变化率 $\Delta e(t)$, 输出变量为控制器的微分系数 K_d 、积分系数 K_i , 误差与误差变化率的隶属度函数为正态分布函数, 模糊推理规则采用模糊 PID 规则库。采用 Python 对设计的控制器内部参数进行优化。控制器内部参数如表 2 所示。

表 2 控制器内部参数

参数	描述
K_p	比例增益
K_i	积分增益
K_d	微分增益
K_f	前馈控制增益
T_d	微分时间常数

2.3 机器人路径跟踪结果与分析

为直观体现本文方法对于机器人移动路径的跟踪性能, 设置运行方式为曲线移动。其中路径中包含 10 个移动障碍物以及 15 个静态障碍物。采用本文方法与虚拟现实技术(方法 1)^[21]、UWB 定位融合方法^[22](方法 2)跟踪机器人在不同

条件下的路径，并将输出路径与期望路径相比较，从而分析本文方法的跟踪效果。机器人路径跟踪结果如图 3 所示。

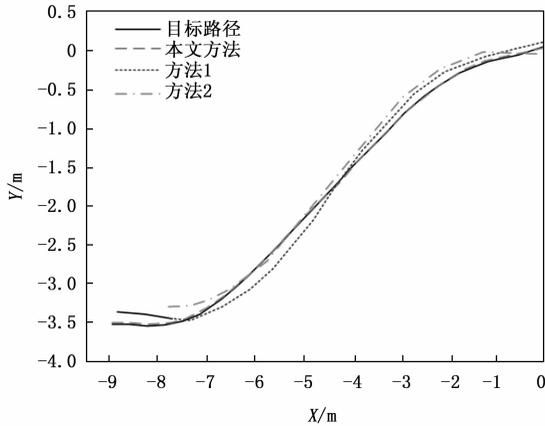


图 3 机器人路径跟踪结果

通过深入分析图 3 所展示的实验结果，可以清晰地观察到，在整个路径跟踪过程中，本文提出的方法所生成的输出路径与预设的期望路径之间实现了几乎完美的吻合。这种高度的吻合程度不仅体现在路径的整体走向上，更在细节处理上展现出了卓越的精确度，没有出现任何显著的跟踪偏差。这一结果有力地证明了本文设计的方法在跟踪机器人移动路径时所具备的显著准确性和稳定性。本文方法的优秀表现不仅在于其能够精准地模拟所需路径，更在于其能够成功地引导机器人在复杂多变的环境中沿预定轨迹稳定前进。这种精准的跟踪能力为机器人在执行各种任务时提供了坚实的运动控制基础，无论是在狭窄的空间内进行精细操作，还是在动态变化的环境中进行快速响应，本文的方法都能够确保机器人运动的一致性和可靠性。

2.4 对比实验与分析

为进一步验证本文方法的实际应用可靠性，实验中引入虚拟现实技术（方法 1）^[21]、UWB 定位融合方法^[22]（方法 2）作为本文方法的对比方法。对比方法的参数设置如表 3 所示。

表 3 对比方法的参数设置

参数	虚拟现实技术 (方法 1)	UWB 定位融合 方法(方法 2)
虚拟环境模拟精度/mm	0.1	—
视觉传感器分辨率/(像素/mm)	5	—
交互反馈频率/Hz	30	—
UWB 信号发射功率/dBm	—	10
接收器灵敏度/dBm	—	-90
距离测量误差/m	—	±0.5

在机器人路径跟踪控制的实验研究中，采用了 3 种不同的控制方法来评估其在实际应用中的性能。这些方法分别是基于滑模控制（SMC）、模型预测控制（MPC）与粒子群优化（PSO）结合 BP 神经网络的复合控制策略，以及利用深度强化学习（DRL）算法的智能体控制。为了客观评

价这些方法的跟踪效果，研究者们选取了路径偏移量作为关键的性能评估指标。路径偏移量是指机器人实际行进路径与预定路径之间的距离差异，偏移量越小，意味着跟踪误差越小，控制精度越高，从而表明相应方法的跟踪效果越佳。机器人路径跟踪结果对比结果如图 4 所示。

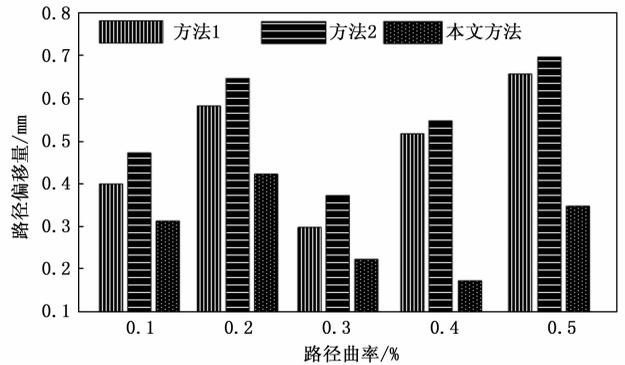


图 4 基于不同方法下的机器人路径跟踪结果对比

由图 4 可以清晰地观察到，在实验中采用本文设计的模糊自适应整定 PID 算法对机器人进行路径跟踪控制，其性能显著优于对照组的传统控制方法。特别是在路径曲率变化较为剧烈的 10%~50% 内，本文方法展现出了卓越的控制精度，路径偏移量始终维持在 0.5 个单位以下，这一表现远超其他对比方法。这一结果不仅验证了本文算法在复杂路径跟踪中的高效性，也突显了其在实际应用中的巨大潜力。本文提出的方法在机器人路径跟踪方面的优异性能，为其在多种实际场景下的应用奠定了坚实的基础。无论是在工业自动化生产线上的精确操作，还是在自动驾驶车辆的智能导航，亦或是在无人机执行复杂任务时的精准飞行，本文的方法都能够提供高精度的路径跟踪支持。这种高精度的跟踪能力不仅有助于机器人在执行任务时实现准确定位，还能够有效提升其在动态环境中的避障能力和导航灵活性，从而在确保安全的同时，提高任务执行的效率和成功率。

为了进一步验证本文方法的可行性，将机器人路径跟踪的 F_1 值作为实验指标，分别采用本文方法、方法 1 及方法 2 进行路径跟踪。跟踪结果如图 5 所示。

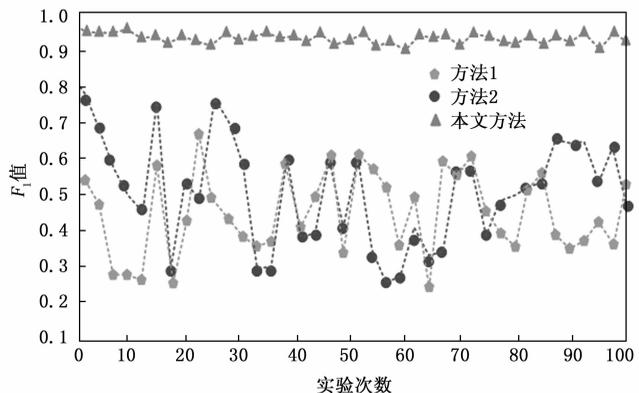


图 5 基于不同方法下的机器人路径跟踪 F_1 值结果对比

通过对图 5 的细致分析,可以明确地观察到,在评估机器人跟踪效果的关键指标—— F_1 值上,本文提出的方法相较于传统方法展现出了显著的优势。 F_1 值,作为精确率和召回率的调和平均数,是衡量分类模型性能的重要指标,在这里它被用来评价机器人路径跟踪的准确性和完整性。本文方法的 F_1 值更接近于理想的 1,这一结果直接反映了其在机器人跟踪任务中的卓越表现。本文方法之所以能够取得如此高的 F_1 值,是因为它在设计时充分考虑了路径跟踪的实时性和准确性,通过模糊自适应整定 PID 算法实现了对机器人运动状态的精确控制。这种控制不仅在直线路径上表现出色,更在曲线和复杂路径上展现了其强大的适应性和鲁棒性。因此,无论是在简单的直线跟踪还是在复杂的多变路径跟踪中,本文方法都能够确保机器人沿着期望路径精确移动,减少了跟踪误差,提高了任务执行的成功率。

3 结束语

本文的研究成果标志着在机器人路径跟踪控制领域的一次重要进展。通过精密的数学建模和算法设计,成功地将模糊自适应整定 PID 算法应用于机器人路径跟踪中,这一算法通过实时计算机人运行航向角并与预设路径的特征点进行匹配,显著提升了路径跟踪的准确性和稳定性。这一创新不仅为机器人控制理论和方法库增添了新的篇章,更为自动驾驶车辆、无人机巡航系统以及智能仓储物流等领域的实际应用提供了切实可行的技术路径。在后续的研究中,可以深入探索算法的优化策略,例如通过引入更先进的机器学习技术或强化学习框架,来进一步提升算法的自适应能力和学习效率。同时,还可以考虑将多传感器融合技术与控制算法相结合,以增强机器人在复杂多变环境中的感知能力和决策精度。此外,对于极端环境下的机器人控制问题,如高动态环境或强干扰场景,未来的研究可以着重于提高算法的鲁棒性和抗干扰能力,确保机器人在各种挑战性任务中均能保持优异的性能表现。

参考文献:

- [1] 李强,李斌,李春明,等.考虑随机延迟的智能机器人路径跟踪控制[J].传感器与微系统,2023,42(10):36-39.
- [2] 史培龙,常宏,王彩瑞,等.基于 PSO-BP 优化 MPC 的无人驾驶汽车路径跟踪控制研究[J].汽车技术,2023(7):38-46.
- [3] 王童,李鹭,宋海萃,等.基于分层深度强化学习的移动机器人导航方法[J].控制与决策,2022,37(11):2799-2807.
- [4] WU G, WANG G, BI Q, et al. Research on unmanned electric shovel autonomous driving path tracking control based on improved pure tracking and fuzzy control[J]. Journal of Field Robotics, 2022, 30(12): 147-149.
- [3] 张燕.基于激光测距技术的机器人移动路径跟踪与实时避障[J].自动化与仪表,2023,38(3):30-34.
- [4] 胡杰,陈锐鹏,张志豪,等.基于 RMPC 的自动驾驶货车路径跟踪控制[J].汽车工程,2023,45(11):2092-2103.
- [5] MANCILLA A M, GARCIA V, CASTILLO O, et al. Optimal fuzzy controller design for autonomous robot path tracking using population-based metaheuristics[J]. Symmetry, 2022, 14(10): 37-41.
- [6] BAI G, MENG Y, GU Q, et al. An anti-sideslip path tracking control method of wheeled mobile robots[J]. Springer, Cham, 2022, 17(12): 127-129.
- [7] SONG W, WANG Z, WANG D Z S. A path tracking method of a wall-climbing robot towards autonomous inspection of steel box girder[J]. Machines, 2022, 10(4): 110-117.
- [8] 金书奎,寇子明,吴娟.煤矿水泵房巡检机器人路径规划与跟踪算法的研究[J].煤炭科学技术,2022,50(5):253-262.
- [9] 陈思衡,张海成,邹伟生,等.考虑系统延时的无人船路径跟踪控制[J].中国造船,2023,64(5):249-258.
- [10] 张品,李长勇.基于改进模糊 PID 的全向搬运机器人路径跟踪控制研究[J].食品与机械,2021,37(6):114-119.
- [11] YUE X, CHEN J, LI Y, et al. Path tracking control of skid-steered mobile robot on the slope based on fuzzy system and model predictive control[J]. International Journal of Control, Automation and Systems, 2022, 20(4): 1365-1376.
- [12] 周维庆,王飞,崔丹,等.基于表格记忆式清扫机器人路径规划方法[J].自动化与仪表,2023,38(10):37-41.
- [13] FAN Z, YAN Y, WANG, et al. Path tracking control of commercial vehicle considering roll stability based on fuzzy linear quadratic theory[J]. Machines, 2023, 11(3): 40-43.
- [14] 杨子兵,周军,孙永佳,等.基于干扰观测器和改进模糊 PID 的农用车辆路径跟踪控制策略[J].现代制造工程,2022(1):52-60.
- [15] 胡琅琅,魏新华,王爱臣,等.基于自适应 MPC 的拖拉机场路跟踪控制方法[J].农机化研究,2024(6):227-233.
- [16] 黄正旭,周坤,王斌锐.基于模糊自适应模型预测控制的移动机器人路径跟踪控制[J].中国计量大学学报,2023,34(3):405-411.
- [17] 吴文波.基于粒子群优化的智能机器人移动路径跟踪控制研究[J].河北北方学院学报:自然科学版,2023,39(5):39-44.
- [18] 李少鹏,黄利华,张磊,等.基于 LOS 导航算法的无人船路径跟踪控制[J].舰船科学技术,2024,21(5):46.
- [19] SATYANARAYANA D, IDRIES N K S, KALBANI A S A, et al. A method for path identification of wheel robot using UHF RFID technology[J]. 2023 5th International Congress on Human-Computer Interaction, Optimization and Robotic Applications (HORA), 2023, 11(3): 1-6.
- [20] WANG D, CHEN J, CHEN Y, et al. Parking robot path-tracking system based on discrete PID algorithm[J]. Journal of Advanced Computational Intelligence and Intelligent Informatics, 2023, 22(5): 39-42.
- [21] 毛芳芳,朱仁义.基于虚拟现实的工业机器人路径跟踪控制仿真[J].齐齐哈尔大学学报:自然科学版,2021,37(1):11-15.
- [22] 邓忠元,刘冉,曹志强,等.基于单 UWB 融合里程计的多机器人相对定位方法[J].计算机应用研究,2023,40(3):839-844.