

文章编号:1671-5896(2026)04-0972-07

基于图优化 DWA 算法的篮球运动员 运球轨迹实时识别方法

孙 鸿¹, 赵宁社², 王 超³, 易晓刚⁴

(1. 西安铁路职业技术学院 基础部 西安 710026; 2. 西安文理学院 信息工程学院, 西安 710065;

3. 陕西师范大学 体育学院, 西安 710062; 4. 石家庄医学高等专科学校 公共课部, 石家庄 050099)

摘要: 针对篮球运动高速运球动作中, 球员突破时会产生位移模糊及运动模糊效应, 难以获取篮球运动员运球轨迹图, 导致运球与实际轨迹间存在偏差的问题, 提出基于图优化 DWA (Dynamic Window Approach) 算法的篮球运动员运球轨迹实时识别方法。获取目标运动员点云数据, 并针对篮球场地及障碍项(其他运动员), 建立栅格地图, 构建运动学模型并建立动态窗口, 模拟出目标运动员的多条运球预测轨迹, 通过动态窗口判定轨迹安全情况, 从多个维度评价确定最佳运球预测轨迹。根据所预测的轨迹, 获取运球过程中的转折点及路径点, 结合 A* 算法获取动态避障路线, 通过剪枝算法得出轨迹图模型。通过设计启发函数构建最终评价函数, 根据评价结果, 确定轨迹图模型中的最优轨迹点, 并利用贝塞尔曲线平滑处理所得轨迹, 通过遍历图模型确定轨迹点优先级别, 综合处理坐标得出平滑性较好的轨迹并可视化输出结果。实验结果表明, 该方法所得识别的运动员运球与实际轨迹间的偏差小于 5 cm, 证明该方法识别篮球运动员运球轨迹准确性较高。

关键词: 图优化 DWA 算法; 轨迹图模型; 动态窗口; 栅格地图; 贝塞尔曲线

中图分类号: TP242

文献标志码: A

Real-Time Recognition Method of Basketball Player's Dribbling Trajectory Based on Graph Optimization DWA Algorithm

SUN Hong¹, ZHAO Ningshe², WANG Chao³, YI Xiaogang⁴

(1. Basic Courses Department, Xi'an Railway Vocational & Technical Institute, Xi'an 710026, China;

2. College of Information Engineering, Xi'an University, Xi'an 710065, China; 3. College of Physical Education, Shaanxi Normal University,

Xi'an 710062, China; 4. Public Course Department, Shijiazhuang Medical College, Shijiazhuang 050099, China)

Abstract: During the high-speed dribbling action in basketball, when a player breaks through, displacement blurring occurs, resulting in a motion blurring effect. It is difficult to obtain the dribbling trajectory map of a basketball player, leading to a deviation between the dribbling trajectory and the actual trajectory. Therefore, a real-time recognition method for basketball players' dribbling trajectories based on the graph optimization DWA (Dynamic Window Approach) algorithm is proposed. Obtaining the point cloud data of the target athlete, and for the basketball court and obstacle events (other athletes), establishing a raster map, a kinematic model is constructed and a dynamic window is established to simulate multiple dribbling prediction trajectories of the target athlete. The trajectory safety is determined through the dynamic window and the best dribbling prediction trajectory from multiple dimensions is evaluated and determined. Based on the predicted trajectory, the turning

收稿日期: 2025-06-26

基金项目: 陕西省体育局常规课题基金资助项目(2020348); 河北省高等教育学会“十四五”规划基金资助项目(GJXH2024-354); 河北省人力资源和社会保障厅基金资助项目(JRS-2024-1073)

作者简介: 孙鸿(1977—), 女, 山东平度人, 西安铁路职业技术学院副教授, 主要从事体育教育教学研究, (Tel)86-13289221222 (E-mail)392747515@qq.com; **通讯作者:** 易晓刚(1983—), 男, 河北张家口人, 石家庄医学高等专科学校副教授, 主要从事体育教学训练学研究, (Tel)86-13832123023 (E-mail)13832123023@163.com。

points and path points during the dribbling process are obtained. Combined with the A* algorithm, the dynamic obstacle avoidance route is acquired, and the trajectory graph model is derived through the pruning algorithm. The final evaluation function is constructed by designing the heuristic function. According to the evaluation results, the optimal trajectory points in the trajectory graph model are determined, and the obtained trajectories are smoothed using Bezier curves. The priority level of the trajectory points is determined by traversing the graph model, and the trajectories with better smoothness are obtained by comprehensively processing the coordinates and visualizing the output results. The experimental results show that the deviation between the dribbling trajectories of the athletes identified by this method and the actual trajectories is less than 5cm, indicating that the dribbling trajectories of basketball players identified by this method have relatively high accuracy.

Key words: graph optimization dynamic window approach(DWA) algorithm; trajectory diagram model; dynamic windows; raster maps; Bezier curves

0 引言

在篮球运动中,运球轨迹的实时识别对运动员技术分析、战术制定以及运动训练效果评估具有重要意义。然而,在高速运球动作中,特别是球员突破时,由于球员和篮球的快速移动,会产生位移模糊和运动模糊效应,其对运球轨迹的准确获取构成了重大挑战。在高速运动中,由于摄像设备的帧率限制或球员移动速度过快,相邻帧间的球员位置变化较大,导致在单帧图像中难以准确识别球员和篮球的具体位置,从而产生位移模糊。由于位移模糊和运动模糊效应的存在,传统的图像处理方法难以准确提取篮球运动员的运球轨迹,导致获取的运球轨迹与实际轨迹间存在偏差,影响后续的技术分析、战术制定和训练效果评估的准确性。

为准确识别篮球运动员运球轨迹,人们已经设计了多种识别方法。苏玺霖等^[1]通过设置采集图像的兴趣区域和透视变换参数,确定识别方位,再根据图像的 RGB(Red, Green, Blue)和 HLS(Hue, Lightness, Saturation)色彩空间,进行二值融合,进而提取出球员和障碍物的轮廓信息,并填充补偿背景像素,最后利用滑动窗格法提取出球员的运球轨迹。但该方法忽略了球员的自身遮挡问题,导致在识别过程中可能会融合其他球员的运动轨迹,造成识别结果不准确。刘锋等^[2]利用 OpenMv 视觉识别方法采集运动员路径图像,再结合曲线拟合法与特征点检测法,得到运动员运球过程中的具体停留点位,以确定其具体运球路径。但该方法易受场地和球员身体遮挡问题的干扰,导致无法准确识别运动员的运球轨迹。向红标等^[3]根据复杂环境中的障碍物信息,确定障碍物方位,并利用基于环形平滑标签的 YOLOv5(You Only Look Once version 5)识别跟踪算法,识别运动员的中心位置与旋转角度,利用改进 RRT*(Rapidly-exploring Random Tree)算法实时修正跟踪所得方法,进而得出篮球运动员的实时运球轨迹。但该方法仍然受球员身体遮挡问题的影响,导致识别结果出现错误。马佳玮等^[4]利用 ETH(Eigenstate Thermalization Hypothesis)构型的工业级 3D 相机采集球场上球员及球场环境的二维图像,并利用三维模型,创建篮球云顶的 3D 点云模型。利用训练好的 YOLOv8 目标检测模型识别球场背景,剔除背景点云信息。结合 RANSAC(Random Sample Consensus)平面拟合和欧式聚类点云处理方法,识别运动员的运动轨迹,并通过球员身体遮挡,得出篮球运动员的运动轨迹坐标,实现对篮球运动员运球轨迹的实时识别。虽然该方法通过剔除背景点云,降低了场地因素对识别结果的影响,但其识别结果的准确性仍需要进一步提升。

为解决上述问题,笔者引入了图优化 DWA(Dynamic Window Approach)算法。利用该算法的动态环境适应能力和多轨迹预测优势,可以降低场地和球员身体遮挡问题的影响,从而保证识别结果的准确性。

1 篮球运动员运球轨迹实时识别方法设计

1.1 基于 DWA 算法生成预测轨迹

为降低场地和球员身体遮挡等干扰对篮球运动员运球轨迹识别结果的影响,笔者引入 DWA 算法,

通过预测篮球运动员运球轨迹,掌握其可能形成的多条运动轨迹,进而为后续识别提供路径基础。DWA算法首先利用点云技术,获取篮球运动员及场地的点云信息,并利用过滤技术去除未选定运动员及场地的点云^[5],获取目标运动员点云数据:

$$\begin{cases} x^2 + y^2 < R_i^2, \\ -L_i < x < 0, \\ -\frac{W_i}{2} < y < \frac{W_i}{2}, \\ -H_i < z < 0, \end{cases} \quad (1)$$

其中 (x, y, z) 表示点云坐标, R_i 表示以运动员为中心设定的保留区域半径, L_i 表示运动员在 x 方向上所占地点云长度, W_i 表示在 y 方向上所占地点云长度, H_i 表示运动员的高度, i 表示运动员序号。

利用栅格,标记场地内的障碍物,得到运动员在运球过程中的栅格地图^[6],如图1所示。

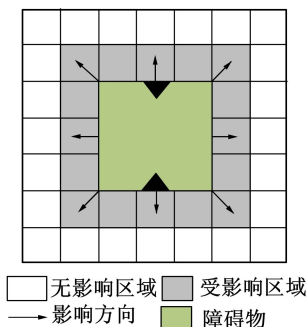


图1 篮球场地图

Fig. 1 Grid map of the basketball court

基于栅格地图和运动员的点云情况,建立运动学模型:

$$\begin{cases} x_i(t) = x_i(t-1) + v_i(t)\Delta t \cos(\alpha(t-1)), \\ y_i(t) = y_i(t-1) + v_i(t)\Delta t \sin(\alpha(t-1)), \\ \alpha(t) = \alpha(t-1) + \omega\Delta t, \end{cases} \quad (2)$$

其中 t 表示时刻, (x_i, y_i) 表示运动员在平面上的坐标, α 表示运动员在变换方向时的运动角度, ω 表示角速度, v_i 表示运动员运动速度。

为精准模拟和预测运动员在场地上的运动行为,依据运动员当前所处状态和运动规律^[7],结合运动学模型,建立基于运动员移动速度范围的动态窗口:

$$v_a = \{[x_i(t), y_i(t)](v_i, \omega_i) \mid v_i \in [v_{\min}, v_{\max}], \omega \in [\omega_{\min}, \omega_{\max}]\}, \quad (3)$$

其中 v_a 表示动态窗口大小, $v_{\min}$ 表示运动员移动过程中最小速度, $v_{\max}$ 表示最大速度, $\omega_{\min}$ 表示运动员在改变运动方向时最小角速度, $\omega_{\max}$ 表示最大角速度。

在该动态窗口中,结合运动员运动加速度,模拟其可能到达的位置,进而模拟出运动员的多条运球预测轨迹。再通过建立动态窗口评价函数^[8],从避障角度,基于所建立的栅格地图,判定各预测轨迹的安全情况:

$$g_1 = \begin{cases} \lceil \delta L \rceil, & 0 \leq q < 0.7, \\ 0, & 0.7 \leq q < 1, \end{cases} \quad (4)$$

其中 g_1 表示安全评价结果, q 表示障碍项(其他运动员)密度, δ 表示安全间隔系数, L 表示运动员最大空间尺寸。

在确保运动安全的前提下,从多个维度对符合安全要求的轨迹路线进行评价。获取综合评价结果^[9]:

$$g_2 = v_a \sigma(\beta h_{\text{head}}(v_i, \omega_i) + \chi d_{\text{dist}}(v_i, \omega_i) + \gamma v_{\text{vel}}(v_i, \omega_i)), \quad (5)$$

其中 g_2 表示综合评价结果, σ 表示归一化系数, β, χ, γ 表示对各维度评价过程的权重数值, h_{head} 表示运动轨迹终点与目标位置(投篮位置)间的角度偏差, d_{dist} 表示二者的距离偏差, v_{vel} 表示达到目标位置的速度偏差。

根据对每个预测轨迹的评价结果,确定最佳轨迹,并将其作为篮球运动员运球预测轨迹,为后续识别过程提供基础。

1.2 篮球运动员运球轨迹图模型构建

基于所预测运球轨迹获取篮球运动员在运动过程中的多个转折点,根据其并结合运动员位置、速度、方向等状态^[10],获取在不同转折点间的所有路径点:

$$s_{m+1} = \frac{s_m + s_{m+2}}{2}, \quad 1 \leq m \leq N, \quad (6)$$

其中 s_m 表示当前路径点, N 表示转折点, m 表示路径点编号。

根据所得路径点, 替换与之不符的预测轨迹位置坐标, 再结合 A* 算法, 获取从起点到最终目标点间的最短路径, 结合所预测路径, 获取动态避障路线^[11]。基于所得轨迹, 建立篮球运动员在运球过程中的约束空间, 同时, 基于运动员本身位置、速度、方向等要素的实际状态, 创建约束空间, 通过剪枝算法^[12], 去除冗余跳点, 得出篮球运动员运球轨迹图模型, 如图 2 所示。

1.3 实现篮球运动员运球轨迹实时识别

基于构建的篮球运动员运球轨迹图模型, 设计启发函数。通过动态调节函数群, 笔者构建了一个基于此时所得运动员运球轨迹的评价函数^[13]:

$$g_3 = g_2 + h(m)s_{m+1}(1 + d/D), \tag{7}$$

其中 g_3 表示基于图模型所识别的运动员运球轨迹评价结果, $h(m)$ 表示启发函数, d 表示当前轨迹点到目标点间的距离长度, D 表示初始点到目标点的距离长度。

根据评价函数, 检测篮球运动员在运球过程中所出现的变向、突破等关键事件^[14], 得出最优轨迹点, 再利用贝塞尔曲线, 平滑处理所得轨迹:

$$\begin{cases} G(u) = \sum_{m=0}^n g_3 F_m B_{m,n}(u), & u \in [0,1], \\ B_{m,n}(u) = \frac{n!}{(n-k)! m!} u^m (1-u)^{n-m}, \end{cases} \tag{8}$$

其中 u 表示象征运动员运动状态参数, n 表示贝塞尔曲线阶数, F_k 表示曲线控制节点, $B_{m,n}(u)$ 表示针对该参数值的基函数, $G(u)$ 表示平滑处理后的运动员运球轨迹。

在构建的图模型中, 对运动员的运球轨迹进行遍历^[15], 得出运动员位于某一位置的目标点时, 下一点的优先级别:

$$\varphi(k) = G(u) [\vartheta(k) + \zeta(k)], \tag{9}$$

其中 k 表示轨迹点, $\varphi(k)$ 表示该轨迹点的综合优先级, $\vartheta(k)$ 表示从起点到该轨迹点的代价值, $\zeta(k)$ 表示达到最终目标点的预计代价。

根据所得不同轨迹点的优先级别, 确定轨迹点的最终坐标, 再综合处理所得坐标, 得出平滑性较好的篮球运动员运球轨迹, 并利用可视化软件输出结果, 实现对篮球运动员运球轨迹的实时识别。

2 实验分析

2.1 设置实验环境

为验证笔者设计方法是否可以准确识别篮球运动员运球轨迹, 以实验中学篮球队作为实验对象, 在仿真软件中建立仿真模型。将篮球场环境设置 12 m×16 m 的长方形区域, 将非目标运动员设置为障碍项, 建立实验平台。对笔者设计方法在预测过程、识别结果准确度进行实验。利用 Matlab 构建动态避障路线如图 3 所示。

实验设置的 DWA 参数如表 1 所示。

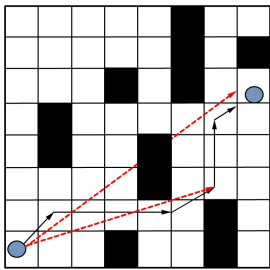


图 2 运动员运球轨迹图模型剪枝过程
Fig.2 The pruning process of athlete dribbling trajectory diagram model

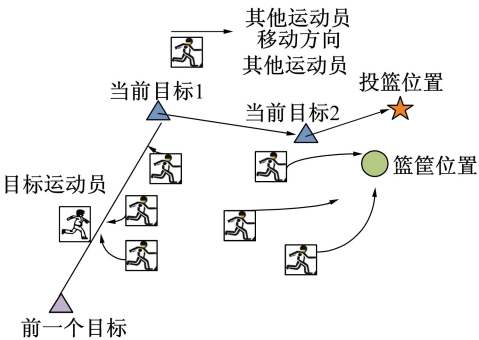


图 3 动态避障路线图

Fig.3 Dynamic obstacle avoidance roadmap

表1 DWA 参数表
Tab.1 DWA parameter table

控制参数项	参数值	单位	控制参数项	参数值	单位
障碍物1 膨胀半径	0.3	m	角速度分辨率	0.5	Rad/s
时间分辨率	0.1	s	轨迹预测时间	3	s
线速度分辨率	0.05	m/s	初始方位角	90°	

2.2 篮球运动员运球轨迹预测准确性实验分析

在笔者设计方法中，准确地预测出篮球运动员的大致运球轨迹是保证后续识别结果准确性的关键步骤。因此，实验利用笔者设计方法预测两个篮球运动员运球轨迹，并将所得预测与实际结果相对比，进而验证该方法对篮球运动员运球轨迹的预测能力。由于运动员是不断移动的，在实验中将其他运动员看作障碍项，其位置为目标运动员到达其他运动员附近时，该运动员所在的位置。

图4给出了两位篮球运动员在运球过程中的预测和实际轨迹，其中，所预测的运球轨迹不存在缺失现象，表明所预测的运球轨迹充分考虑到了场地及球员身体遮挡等干扰问题，避免了跟踪中断或错误的现象。通过与实际轨迹对比可知，笔者设计方法所预测的运球与实际轨迹重合度较高，达到93.6%，虽然部分位置存在偏差，但偏差度较小，偏差直线距离不超过0.3 m。由此可知，笔者设计方法对篮球运动员运球轨迹的预测能力较强，预测结果较为准确。

2.3 篮球运动员运球轨迹识别效果实验分析

为验证笔者设计方法是否可以识别出篮球运动员的运球轨迹，实验利用笔者设计方法，识别其中3位篮球运动员的运球轨迹，同时，将非识别对象作为障碍项，得到识别结果如图5所示。

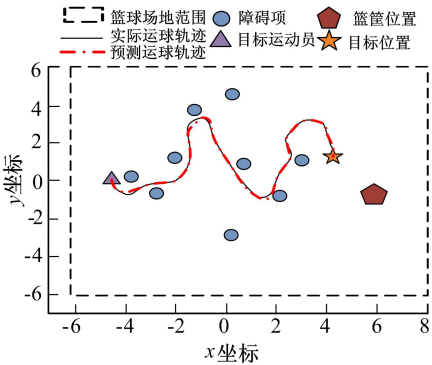


图4 运球轨迹预测结果
Fig.4 Dribble trajectory prediction results

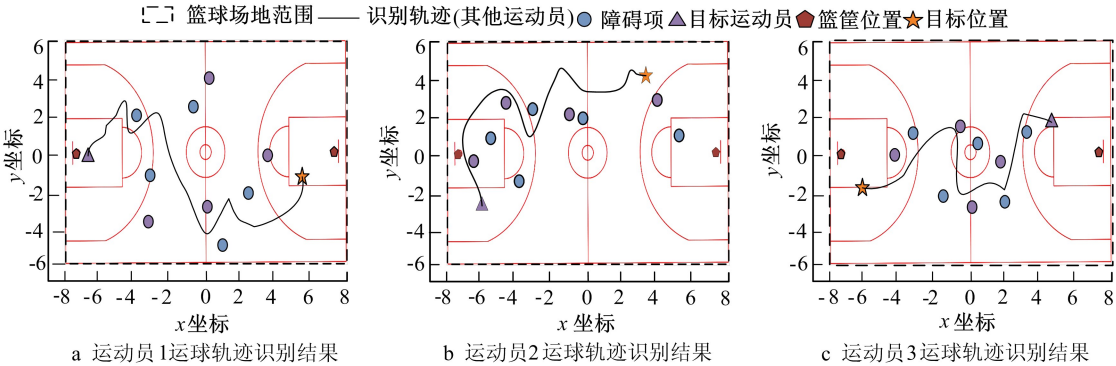


图5 多位运动员运球轨迹识别结果
Fig.5 Recognition of the dribble trajectory of multiple athletes

从图5可看出，所识别的运球轨迹均未发生与障碍项相撞的情况，且所识别结果平滑度较高，不存在割断现象。并由其中关键点位置的运球轨迹可以看出，所识别结果考虑到了变向、突破等关键事件，实时调整了运动员的运球轨迹识别结果。由此可知，笔者设计方法可以识别出篮球运动员的运球轨迹，且识别效果较好。

2.4 篮球运动员运球轨迹识别准确度实验分析

为验证所识别结果的准确性，实验利用笔者设计方法、基于机器视觉的爬管机器人路径信息识别算法和复杂环境下磁弹性微型游泳机器人的路径规划与识别跟踪算法对篮球运动员的运球轨迹进行识别，并抽取30个轨迹点，计算识别轨迹各点与实际点坐标间的距离长度，验证3种方法对篮球运动员运球

轨迹识别结果的准确度。

由图6可看出,笔者设计方法所识别与实际轨迹点间的差距不足5 cm,多数与实际轨迹点间的差距为0。其是由于篮球运动过程中,经常出现不同运动员间的身体接触,造成在该过程中所识别到的轨迹点出现偏差,但笔者设计方法所出现处偏差数值较小,不影响制定篮球战术。而其他两种方法所得与实际轨迹点间的差距均大于笔者设计方法,其使所识别结果不准确,难以利用所得结果制定合理的篮球战术。由此可知,笔者设计方法对篮球运动员运球轨迹的识别具有较高的准确度。

3 结 语

笔者利用DWA算法,建立描述篮球运动场景和障碍物的栅格地图,再通过动态窗口预测出目标运动员的运球轨迹,并结合A*算法,选定运动员的动态避障路线图。通过剪枝算法去除冗余跳点,以获取篮球运动员运球轨迹图模型。利用贝塞尔曲线平滑处理所得轨迹,根据轨迹点的优先级别,得出精确度较高的运球轨迹,有效提高了识别结果的准确性。但由于篮球运动中,可能会出现许多因运动员自身因素造成的轨迹变化,而笔者所设计的方法中评价函数并未考虑到上述问题,导致其识别结果准确性会存在偏差。在未来研究中,应充分考虑运动员的自身影响,以提高识别结果的准确性。

参考文献:

[1] 苏玺霖, 樊春玲, 张春堂. 基于机器视觉的爬管机器人路径信息识别算法 [J]. 电子测量技术, 2022, 45 (22): 92-98.

SU X L, FAN C L, ZHANG C T. Path Information Recognition Algorithm of Tube Climbing Robot Based on Machine Vision [J]. Electronic Measurement Technology, 2022, 45 (22): 92-98.

[2] 刘锋, 夏铁牛, 李亚卫. 双闭环PID应用下投篮机器人路径跟踪控制研究 [J]. 机械设计与制造, 2024(1): 374-378.

LIU F, XIA T N, LI Y W. Research on Path Tracking Control of Shooting Robot with Double Closed Loop PID Application [J]. Machinery Design & Manufacture, 2024(1): 374-378.

[3] 向红标, 杨大虎, 杨璐, 等. 复杂环境下磁弹性微型游泳机器人的路径规划与识别跟踪 [J]. 机械工程学报, 2023, 59 (5): 89-99.

XIANG H B, YANG D H, YANG L, et al. Path Planning and Recognition Tracking of a Magnetoelastic Miniature Swimmer in Complex Environment [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2023, 59 (5): 89-99.

[4] 马佳玮, 孙菁伯, 迟关心, 等. 基于立体视觉和YOLO深度学习的焊缝识别与机器人路径规划算法 [J]. 焊接学报, 2024, 45(11): 45-49.

MA J W, SUN J B, CHI G X, et al. Weld Identification and Robot Path Planning Algorithm Based on Stereo Vision and YOLO Deep Learning Framework [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2024, 45 (11): 45-49.

[5] 朱立学, 莫冬炎, 官金炫, 等. 基于U-Net的肉鸽养殖场机器人视觉导航路径识别方法 [J]. 中国农机化学报, 2023, 44(10): 217-223.

ZHU L X, MO D Y, GUAN J X, et al. Path Recognition Method of Robot Visual Navigation for Meat Pigeon Breeding Farm Based on U-Net [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2023, 44(10): 217-223.

[6] 蒋华扬, 吴涛, 任建鑫, 等. 基于改进DWA算法的移动机器人局部路径规划 [J]. 机械设计与研究, 2024, 40(5): 229-234.

JIANG H Y, WU T, REN J X, et al. Research on Local Path Planning of Mobile Robot Based on Improved DWA Algorithm [J]. Machine Design and Research, 2024, 40(5): 229-234.

[7] 冯新, 杨雄, 曾豫豪. 多场景下基于IGJO-DWA算法的机器人路径规划 [J]. 传感器与微系统, 2024, 43(11): 131-134, 138.

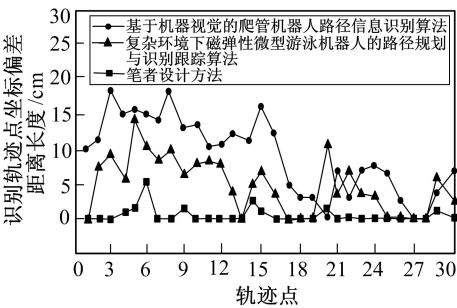


图6 识别轨迹与实际轨迹之间偏差情况
Fig.6 Identify deviations between the trajectory and the actual trajectory

- FENG X, YANG X, ZENG Y H, et al. Robot Path Planning Based on IGJO-DWA Algorithm in Multiple Scenarios [J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2024, 43(11): 131-134, 138.
- [8] 刘宙浩, 万超一, 尹明锋, 等. 改进 A* 算法与 DWA 融合的移动机器人的路径规划算法研究 [J]. 制造业自动化, 2023, 45(12): 55-60.
- LIU Y H, WAN C Y, YIN M F, et al. Research on Path Planning Algorithm of Mobile Robot Based on Improved A* Algorithm and Dynamic Window Approach [J]. Manufacturing Automation, 2023, 45(12): 55-60.
- [9] 李成, 黄学能, 石习双, 等. 超特高压输电线路导线非线性运动轨迹识别 [J]. 电子设计工程, 2025, 33(9): 140-143, 148.
- LI C, HUANG X N, SHI X S, et al. Nonlinear Motion Trajectory Recognition of Ultra-High Voltage Transmission Line Conductors [J]. Electronic Design Engineering, 2025, 33(9): 140-143, 148.
- [10] 毕松, 余鑫. 基于 3D 点云分析的果园行间穿梭机器人路径规划方法 [J]. 农业机械学报, 2024, 55(10): 37-50.
- BI S, YU X. Path Planning Method for Inter-Row Shuttle in Densely Planted Orchards [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(10): 37-50.
- [11] 赵倩, 石宇强. 融合改进 A* 算法与 DWA 的 AGV 实时路径规划及避障研究 [J]. 现代制造工程, 2025(5): 91-98.
- ZHAO Q, SHI Y Q. Research on Real Time Path Planning and Obstacle Avoidance of AGV by Integrating Improved A* Algorithm and DWA [J]. Modern Manufacturing Engineering, 2025(5): 91-98.
- [12] 齐款款, 李二超, 毛玉燕. 改进 A* 算法融合自适应 DWA 的移动机器人动态路径规划 [J]. 数据采集与处理, 2023, 38(2): 451-467.
- QI K K, LI E C, MAO Y Y. Dynamic Path Planning of Mobile Robot Based on Improved A* Algorithm and Adaptive DWA [J]. Journal of Data Acquisition and Processing, 2023, 38(2): 451-467.
- [13] 郭文豪, 陈炎, 余任凭, 等. 融合跳点搜索和动态窗口算法的 AGV 路径规划 [J]. 云南大学学报(自然科学版), 2025, 47(2): 233-243.
- GUO W H, CHEN Y, YU R P, et al. AGV Path Planning Combining Jump Point Search and Dynamic Window Algorithm [J]. Journal of Yunnan University (Natural Sciences Edition), 2025, 47(2): 233-243.
- [14] 谢赛宝, 刘春阳, 陈帆, 等. 基于视觉的自主机器人障碍识别与路径规划 [J]. 电子测量与仪器学报, 2022, 36(12): 185-192.
- XIE S B, LIU C Y, CHEN F, et al. Obstacle Recognition and Path Planning Method Based on Mobile Robot [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2022, 36(12): 185-192.
- [15] 刘钰铭, 黄海松, 范青松, 等. 基于改进 A*-DWA 算法的移动机器人路径规划 [J]. 计算机集成制造系统, 2024, 30(1): 158-171.
- LIU Y M, HUANG H S, FAN Q S, et al. Mobile Robot Path Planning Based on Improved A*-DWA Algorithm [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2024, 30(1): 158-171.

(责任编辑: 刘东亮)