

doi: 10.7690/bgzd.2022.02.018

机器人战术靶示教路径采样和跟踪控制

张朋, 王宇

(南京润景丰创信息技术有限公司产品研发部, 南京 210000)

摘要: 针对机器人战术靶在实际战术演练中需实现任意路径的跟踪控制, 提出一种示教路径采样和跟踪控制策略。基于 2 种示教分别制定路径点采样策略, 其中: 在线示教人工远程操作机器人战术靶行走, 构建基于行驶距离和转弯半径的路径点采样策略; 离线示教通过上位机在地图文件上编辑定义一系列离散的路径点来完成示教路径的绘制。路径再现阶段读取之前存储的示教路径, 采用节点跟踪切换控制策略、速度分段控制策略、基于航向和偏距组合误差的方向控制策略来控制机器人对路径的跟踪。在物理样机上对算法进行验证, 结果表明: 机器人战术靶可很好地对任意复杂示教路径进行跟踪, 其中路径跟踪偏差小于 0.3 m, 各路径点到点跟踪速度偏差小于 5%。

关键词: 机器人战术靶; 路径点采样; 示教路径; 跟踪控制

中图分类号: TJ06 **文献标志码:** A

Teaching Path Sampling and Tracking Control of Robot Tactics Target

Zhang Peng, Wang Yu

(Product Research & Development Department, Nanjing Runjingfengchuang Information Technology Co., Ltd., Nanjing 210000, China)

Abstract: In order to realize the tracking control of arbitrary path in the actual tactical exercise of robot tactical target, a strategy of teaching path sampling and tracking control is proposed. The path point sampling strategy is established based on the 2 teaching methods, in which the path point sampling strategy based on the driving distance and turning radius is established for the online teaching of manual remote operation of robot tactical target walking, and the teaching path is drawn by editing and defining a series of discrete path points on the map file through the host computer for offline teaching. In the path reproduction stage, the taught path stored before is read, and the path tracking of the robot is controlled by using a node tracking switching control strategy, a speed segmentation control strategy and a direction control strategy based on a heading and offset combined error. The algorithm is verified on the physical prototype, and the results show that the robot tactical target can track any complex teaching path well, in which the path tracking deviation is less than 0.3 m, and the point-to-point tracking speed deviation of each path is less than 5%.

Keywords: robot tactics target; path point sampling; teaching path; tracking control

0 引言

近年来, 世界新军事革命迅猛发展, 各大国加紧开发新型军事技术和装备, 加上当前国内外反恐形势日趋严峻, 需要构建一种新型的训练体系来快速有效地提高受训人员的战术素养^[1-2]。战术训练靶标作为军事训练中最常用的设备之一, 主要是固定式靶标、往返式或轨道式运动靶车、直线冲撞靶车等, 存在缺乏实战紧迫感, 训练科目单一, 缺乏对抗性等问题, 且训练人员容易根据经验进行提前轨迹预判, 难以有效提高训练人员的综合素养^[3-4]。

将机器人与战术训练靶标结合, 构建机器人战术训练靶标, 一般可搭载不同类型的靶机进行战术演练, 具备程控直线、曲线高速冲撞、规划路径往返冲撞、自动归位等战术训练功能。由于训练场景

环境并不单一, 机器人战术靶需根据实际战术需要行驶不同的路径, 常规的路径规划并不能完全满足训练需要。可借鉴工业机器人轨迹示教再现方法, 在示教阶段不同时间点下对机器人位姿进行采样, 记录机器人各关节传感器信息, 再现阶段利用之前记录的传感器信息, 通过控制算法控制各关节电机运动, 跟踪之前的示教位姿, 优点是可减少复杂控制算法的开发, 易实现复杂动作, 降低硬件投入^[5-7]。

笔者提出一种机器人战术靶示教路径采样和跟踪控制策略, 并在物理样机上对算法进行验证。验证结果表明: 机器人战术靶可以很好地对任意复杂示教路径进行跟踪, 其中路径跟踪偏差小于 0.3 m, 各路径点的到点跟踪速度偏差小于 5%。

收稿日期: 2021-10-29; 修回日期: 2021-11-28

作者简介: 张朋(1989—), 男, 江苏人, 硕士, 工程师, 从事智能报靶相关技术、机器人靶导航控制、电机伺服控制研究。

E-mail: zphx_cumt@126.com。

1 机器人战术靶系统组成

机器人战术靶系统主要由底盘、报靶设备和后台控制中心组成，其系统架构如图 1 所示。其中机器人底盘主要包括底盘控制器、传感器组件和行走驱动部件，底盘控制器包含基于 ROS 系统的 IPC 工控机和底层驱动控制的 ARM 控制器，传感器组件包括用于地图构建和实时定位的激光雷达、用于人体追踪和视觉巡线的深度摄像头、用于机器人姿态采集的 9 轴陀螺仪和用于防撞的超声波传感器，行走驱动组件包括伺服驱动器、伺服电机及麦克纳姆轮；报靶设备一般采用固定式多功能靶标、立体人形靶标，通过有线的形式与底盘通信；后台控制中心通过无线网络与机器人底盘进行数据交互。机器人战术靶 3 维模型如图 2 所示。

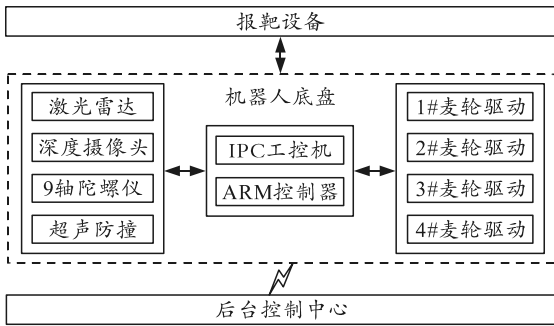


图 1 机器人战术靶系统架构

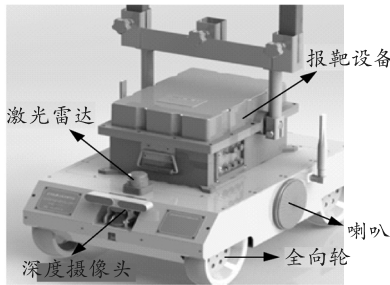


图 2 机器人战术靶 3 维结构

2 路径示教采样策略

机器人战术靶路径示教模式包括在线示教和离线示教，下面分别介绍这 2 种示教模式下的路径采样策略。

2.1 在线示教采样策略

在线示教一般是通过遥控器或键盘远程操作机器人战术靶行走，在行走过程中记录机器人战术靶的位置和速度信息。传统的采样策略一般是直接基于时间片来采样，未考虑直线行驶和曲线行驶的不同特征，造成曲线行驶路径点会偏少，直线行驶路径点偏多，不能完全表达原路径的特征，笔者提出

一种基于行驶距离和转弯半径的路径点采样策略，采样距离阈值与实时的行驶转弯半径成正相关。

1) 行驶转弯半径 r_k 计算。

机器人战术靶转弯示意图如图 3 所示，在 2 个时间点上分别表示机器人战术靶 t_k 时刻方向角 θ_k 和位置坐标 (x_k, y_k) ，前一时刻 t_{k-1} 的方向角 θ_{k-1} 及位置坐标 (x_{k-1}, y_{k-1}) 。

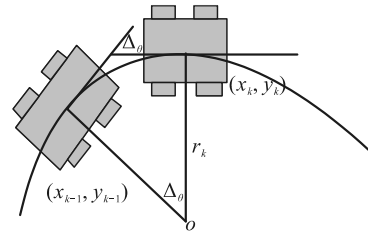


图 3 机器人战术靶转弯

若采样时间间隔较短，其运动过程可近似为圆弧运动或直线运动，根据圆弧弧长的计算公式，可得到该时刻的转弯半径：

$$\left. \begin{aligned} \delta &= \theta_k - \theta_{k-1} \\ \Delta_\theta &= \begin{cases} \delta & (|\delta| \leq \pi) \\ \delta + 2\pi & (\delta < -\pi) \\ \delta - 2\pi & (\delta > \pi) \end{cases} \\ \Delta_{len} &= \sqrt{(x_k - x_{k-1})^2 + (y_k - y_{k-1})^2} \\ r_k &= \begin{cases} c & (|\Delta_\theta| \leq \xi) \\ \Delta_{len} / |\Delta_\theta| & (|\Delta_\theta| > \xi) \end{cases} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中： δ 为前后 2 个时刻方向角的角度差； Δ_θ 为角度差 δ 在 $[-\pi, \pi]$ 的取值变换； Δ_{len} 为前后 2 个时刻距离值； r_k 为当前时刻的转弯半径； ξ 为角度差阈值。当方向角的角度差低于 ξ 时，可近似为走直线，此时转弯半径 r_k 取常数 r_c ，这里取常数 r_c 为 100 m；当方向角的角度差大于 ξ 时，可近似为圆弧运动，此时转弯半径 r_k 根据圆弧弧长的计算公式得到。

2) 采样距离 d_s 计算。

采样距离的取值会直接影响整个示教路径需存储的路径点个数。若采样距离取值太小，则存储的路径点太多，在示教再现阶段跟踪的目标点个数变多，计算量大，运行也不流畅；若采样距离取值太大，则存储的路径点太少，容易丢失路径特征，在示教再现阶段实际行驶的轨迹与示教轨迹出入很大。笔者根据转弯半径来分段设计采样距离：

$$d_s = \begin{cases} d_{s-min} & (r_k < d_{s-min}) \\ r_k & (d_{s-min} \leq r_k \leq d_{s-max}) \\ d_{s-max} & (r_k > d_{s-max}) \end{cases} \quad (2)$$

式中： d_{s_min} 为最小采样距离值； d_{s_max} 为最大采样距离值。这 2 个值的选取需根据机器人战术靶的行驶速度来确定，机器人战术靶模拟人的行走，速度范围 0~3 m/s，通过算法实际测试调优，取 d_{s_min} 为 1 m， d_{s_max} 为 2.5 m。

机器人战术靶在线示教数据采集策略流程如图 4 所示。首先，机器人战术靶通过后台控制指令将当前运行模式切换为在线示教采集模式，等待机器人定位成功后，存储第 1 个位置点信息，延时单个采样时间后，计算当前位置与上一个点位置距离和转弯半径；紧接着累加行驶的距离信息，根据转弯半径实时计算采样距离，当行驶距离大于采样距离后，记录当前点的信息(包含位置、到点速度、路径段平均速度)，再判断累计的路径点数是否大于阈值 N_{max} 和所接收的控制指令模式来决定是否继续采集，否则结束当前的在线示教数据采集；最后，将上述路径点信息写入在线示教路径文件中。

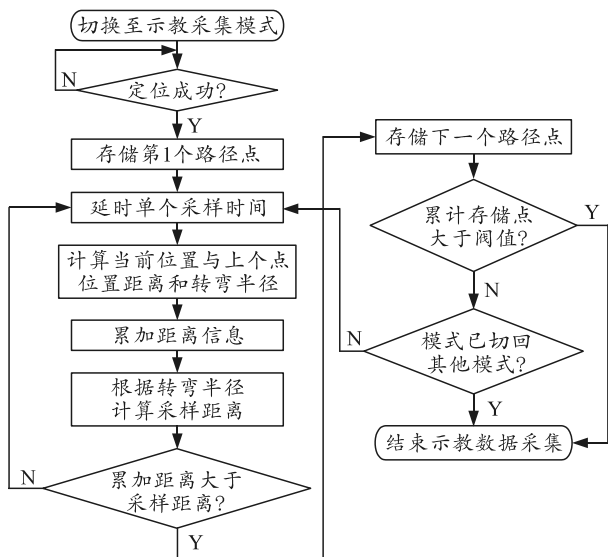


图 4 机器人战术靶在线示教数据采集策略流程

2.2 离线示教采样策略

如图 5 所示，离线示教一般是通过上位机软件对地图文件进行编辑，通过定义一系列离散的路径点和相邻点之间的行走模式(点跟踪、直线跟踪、曲线跟踪)和跟踪速度来完成路径的绘制。

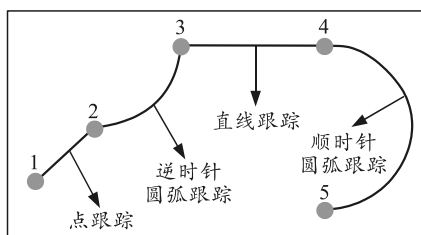


图 5 机器人战术靶离线示教行走模式

机器人战术靶离线示教数据采集流程如图 6 所示。首先，机器战术靶后台软件打开路径绘制界面，在地图上标记第 1 个路径点，再选择下个子目标点，选中 2 点后设置 2 点之间的跟踪模式(点跟踪、直线跟踪、圆弧跟踪)和跟踪速度，再根据所设置的跟踪模式来确定路径段跟踪辅助点，以圆弧跟踪为例，其跟踪辅助点为圆心位置；紧接着再累加规划距离，判断规划距离是否超过设定值，若超过直接退出路径绘制，若没超出再判断是否接收到退出路径绘制指令，若无指令则继续进行路径采集操作，否则退出路径绘制；最后，将离线示教的路径信息保存到文件中。

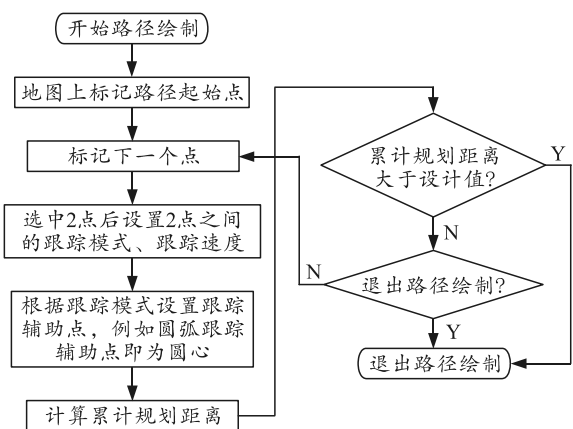


图 6 机器人战术靶离线示教数据采集流程

3 路径跟踪控制策略

路径采样存储后，路径跟踪是对示教路径的再现。机器人战术靶路径跟踪包括在线示教路径和离线示教路径跟踪，通过读取之前存储的示教路径信息，行驶速度上采用分段控制策略，方向上构建基于航向和偏距组合的误差模型来控制机器人战术靶的本身旋转，进而实现整个机器人战术靶对示教路径的跟踪。下面分别详细介绍这 2 种跟踪控制策略。

3.1 在线示教路径跟踪

在线示教路径跟踪策略主要包括路径节点切换策略、速度控制策略和航向控制策略。下面分别对这 3 种控制策略进行描述。

1) 节点跟踪切换策略。

由于路径文件中包含一系列的路径存储点，机器人战术靶在跟踪过程中需逐一对每个点进行跟踪。需解决的问题是如何可靠地从当前跟踪点切换至下一个跟踪点。笔者提出一种节点切换策略，引入节点切换距离阈值、提前预判距离阈值和异常判断次数概念。具体节点跟踪切换步骤如图 7 所示。

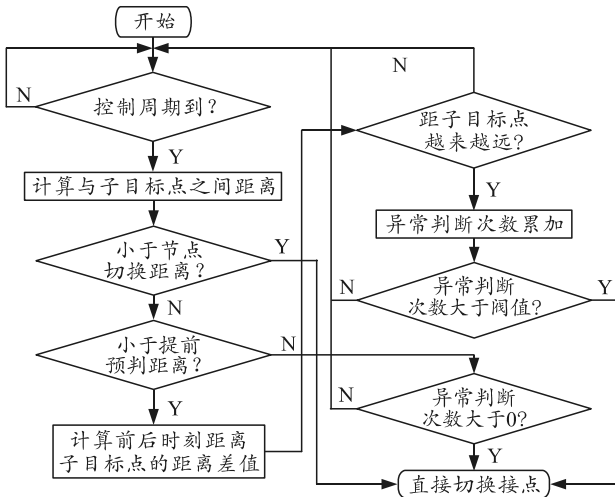


图 7 节点跟踪切换策略

首先, 在控制周期 T_c 到来时判断机器人战术靶与子目标点之间的距离, 若小于节点切换距离 d_{ns} , 则立即切换节点, 否则继续判断是否小于节点提前预判距离 d_{js} , 若不是则判断异常判断次数 k 是否等于 0, 若不是等于 0 直接切换节点, 否则等待下一个控制周期 T_c ; 若小于节点提前预判距离 d_{js} , 则计算前后时刻距离子目标点的距离差值, 根据差值判断是否距离子目标点越来越远, 若是则异常判断次数 k 累加, 并与异常判断次数阈值 k_{max} 比较, 超出阈值直接切换节点, 否则等待下一个控制周期 T_c , 若离子目标点越来越近, 等待下一个周期。

2) 速度控制策略。

速度控制策略流程如图 8 所示。

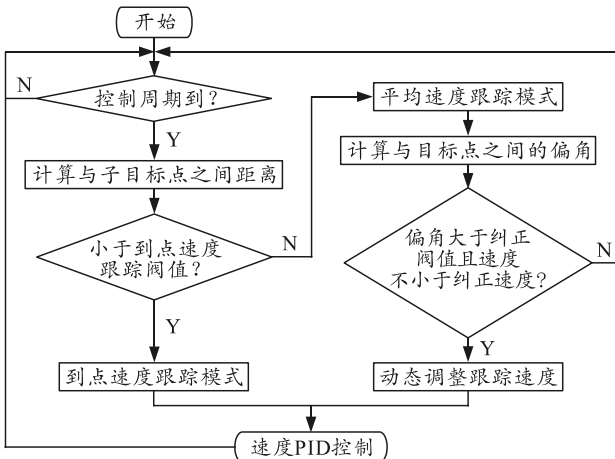


图 8 速度控制策略流程

点速度跟踪距离阈值 l_s 的设定与该路段平均速度 \bar{v} 和到点速度 v_p 有关:

$$l_s = fabs(\bar{v} - v_p) \cdot \eta_v \quad (3)$$

式中 η_v 为速度切换系数, 取值范围 [0, 1]。

动态速度调整策略与偏角和纠正速度有关:

$$v_t = (\bar{v} - v_a) / l_a \cdot l_b + v_a \quad (4)$$

式中: v_t 为待跟踪的速度; v_a 为纠正速度; l_a 为最大纠正距离; l_b 为当前位置与子目标点距离且满足 $l_b \leq l_a$ 。

3) 航向控制策略。

对于在线示教路径跟踪, 航向控制分为点跟踪控制和直线跟踪控制。2 种控制方式与距子目标点的距离有关, 通过设定合理的距离阈值, 距离较远时采用直线跟踪, 距离较近时采用点跟踪。

对于点跟踪模式, 计算当前车头位置朝向和当前位置指向子目标点构成的夹角之间的角度差, 调整机器人本体旋转的角速度, 使得夹角绝对值趋于 0, 角度差 Δ_θ 的求解如式(5)所示, 角速度求解如式(6)所示:

$$\Delta_\theta = \begin{cases} \delta & (|\delta| \leq \pi) \\ \delta + 2\pi & (\delta < -\pi) \\ \delta - 2\pi & (\delta > \pi) \end{cases} \quad (5)$$

式中: θ_{dest} 为当前位置点指向子目标点构成的角度; θ_{cur} 为当前的位置朝向。

$$w_z = \begin{cases} \max(w_{min}, \min(w_{max}, \Delta_\theta)) & (\Delta_\theta \geq \theta_a) \\ \min(-w_{min}, \max(-w_{max}, \Delta_\theta)) & (\Delta_\theta < \theta_a) \end{cases} \quad (6)$$

式中: w_z 为机器人旋转的角速度; w_{min} 为最小旋转角速度; w_{max} 为最大旋转角速度; θ_a 为角度差控制阈值。

对于直线跟踪模式, 与点跟踪相比不仅要考虑角度偏差 Δ_θ , 而且需考虑偏距误差 Δ_d , 其跟踪模型如图 9 所示。

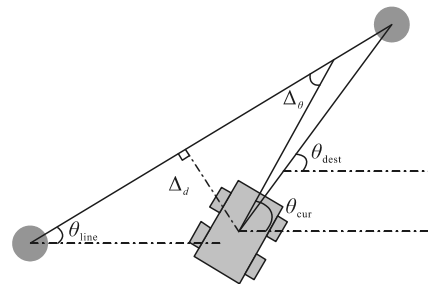


图 9 直线跟踪模型

角度偏差 Δ_θ 计算公式:

$$\Delta_\theta = \begin{cases} \delta & (|\delta| \leq \pi) \\ \delta + 2\pi & (\delta < -\pi) \\ \delta - 2\pi & (\delta > \pi) \end{cases} \quad (7)$$

式中: θ_{line} 为路径段直线跟踪角度; θ_{cur} 为当前的位

置朝向。

偏距误差 Δ_d 计算公式：

$$\Delta_d = l_d \cdot \sin(\theta_{\text{dest}} - \theta_{\text{line}}) \quad (8)$$

式中： l_d 为当前位置与子目标点之间的距离； θ_{dest} 为当前位置点指向子目标点构成的角度。

根据以上 2 部分，选取合适的权重系数 ϖ_θ 和 ϖ_d 构建总误差 Δ_{error} 模型：

$$\Delta_{\text{error}} = \varpi_\theta \cdot \Delta_\theta + \varpi_d \cdot \Delta_d \quad (9)$$

根据总误差 Δ_{error} 值，调整机器人本体旋转的角速度，使得 Δ_{error} 值趋于 0，角速度求解与式(6)一致。

3.2 离线示教路径跟踪

离线示教路径跟踪与在线示教路径跟踪原理基本一致，同样包括 3 部分：路径节点切换策略、速度控制策略和航向控制策略。其中前 2 部分基本一致，不再赘述，第 3 部分航向控制相比在线示教路径跟踪多了一种曲线跟踪模式，根据顺序又可分为顺时针曲线跟踪和逆时针曲线跟踪。

对于曲线跟踪，与直线跟踪类似，也要考虑角度偏差 Δ_θ 和偏距误差 Δ_d ，其跟踪模型如图 10 所示。

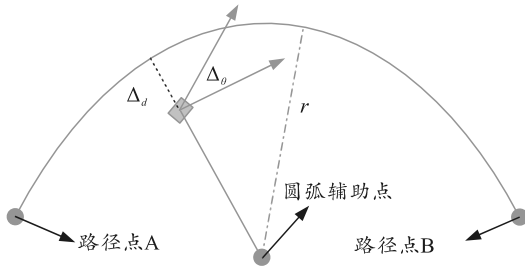


图 10 圆弧跟踪模型

角度偏差 Δ_θ 计算公式：

$$\Delta_\theta = \begin{cases} \delta & (|\delta| \leq \pi) \\ \delta + 2\pi & (\delta < -\pi) \\ \delta - 2\pi & (\delta > \pi) \end{cases} \quad (10)$$

式中： θ_{arc} 为当前位置指向圆弧辅助点夹角； θ_{cur} 为当前的位置朝向； κ 为符号参数，顺时针圆弧取负，逆时针圆弧取正。

偏距误差 Δ_d 计算公式：

$$\Delta_d = l_d - r \quad (11)$$

根据以上 2 部分，选取合适的权重系数 ϖ_θ 和 ϖ_d 构建总误差 Δ_{error} 模型：

$$\Delta_{\text{error}} = \varpi_\theta \cdot \Delta_\theta + \kappa \cdot \varpi_d \cdot \Delta_d \quad (12)$$

根据总误差 Δ_{error} 值，调整机器人本体旋转的角速度，使得 Δ_{error} 值趋于 0，角速度求解与式(6)一致。

4 实验结果与分析

针对上述路径示教采样策略和路径跟踪策略，在机器人物理样机上对算法的可行性进行验证。

4.1 调试环境搭建

机器人战术靶平台样机如图 11 所示，机器人战术靶工作场景——某室外射击训练靶场如图 12 所示。

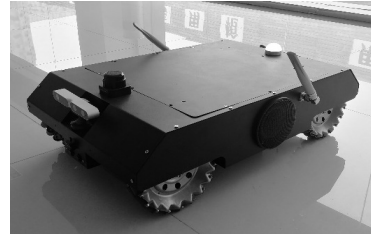


图 11 机器人战术靶平台样机



图 12 某室外射击训练靶场

机器人战术靶平台利用激光雷达、里程计和陀螺仪等信息构建靶场 2 维栅格地图，如图 13 所示。

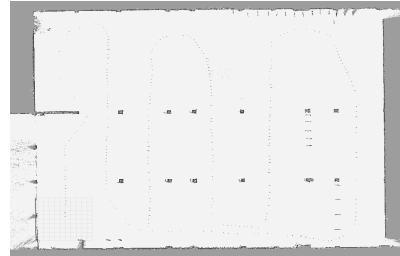


图 13 靶场 2 维栅格地图

4.2 算法参数设置

以在线示教路径采样与跟踪为例，在线示教路径采样算法参数主要包括：前后时刻角度差阈值 ζ 、转弯半径常数 r_c 、最小采样距离值 $d_{s-\text{min}}$ 、最大采样距离值 $d_{s-\text{max}}$ 、采样周期 T_s 、采样点数阈值 N_{max} ，具体算法参数取值如表 1 所示。

表 1 在线示教路径采样算法参数取值

算法参数	取值
角度差阈值	0.01
转弯半径常数/m	100
最小采样距离值/m	1
最大采样距离值/m	2.5
采样周期/s	0.5
采样点数阈值	100

在线路径跟踪策略算法参数主要包括：节点切换距离 d_{ns} 、节点提前预判距离 d_{js} 、异常判断次数阈值 k_{max} 、控制周期 T_c 、速度切换系数 η_v 、纠正速度 v_a 、最大纠正距离 l_a 、角度差控制阈值 w_a 、最小旋转角速度 w_{min} 、最大旋转角速度 w_{max} 、角度权重系数 ω_θ 、偏距权重系数 ω_d ，具体算法参数取值如表 2 所示。

表 2 在线示教路径跟踪算法参数取值

算法参数	取值
节点切换距离/m	0.30
节点提前预判距离/m	0.80
异常判断次数阈值	3.00
控制周期/s	0.10
速度切换系数	0.30
纠正速度/(m/s)	0.50
最大纠正距离/m	2.00
角度差控制阈值	0.14
最小旋转角速度/(rad/s)	0.05
最大旋转角速度/(rad/s)	0.50
角度权重系数	0.40
偏距权重系数	0.60

4.3 示教路径采集

以在线示教为例，利用遥控手柄控制机器人战术靶在射击训练靶场内自由行走，行走速度 1 m/s 左右，并根据示教路径采样策略对行走的路径进行采集，采集的路径如图 14 所示，每个实心块代表一个路径采样点，按图中箭头指向从起点到终点。

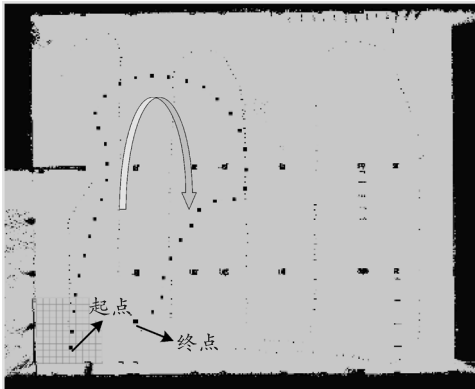


图 14 在线示教采样路径

4.4 示教路径跟踪

对上节的在线示教路径进行跟踪控制，跟踪后的路径如图 15 所示，可看出跟踪路径能有效地跟踪每一个路径点。图 16 为跟踪路径各路径段的偏距误差，与原采样路径相比，整体路径跟踪偏差小于 0.3 m。图 17 为路径到点跟踪速度曲线，虚线为实际跟踪速度，实线为示教速度，可算出各路径点到点跟踪速度偏差均小于 5%。

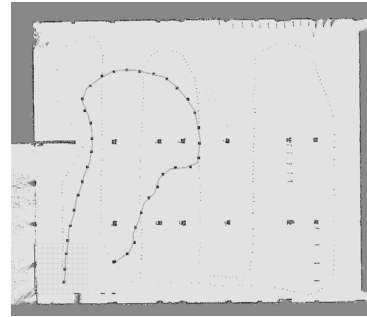


图 15 在线示教路径跟踪

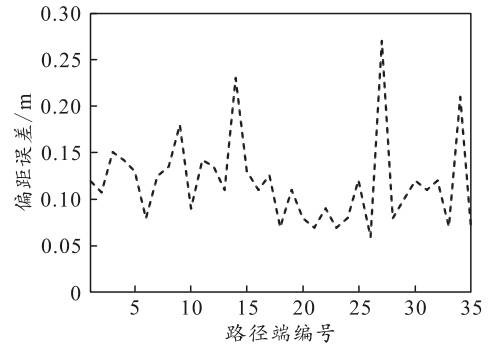


图 16 各路径段的偏距误差

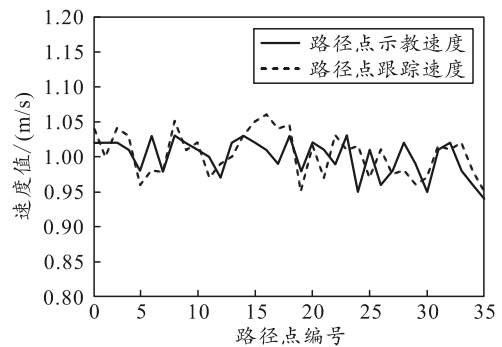


图 17 路径到点跟踪速度

5 结束语

笔者提出一种机器人战术靶示教路径采样和跟踪控制策略，配合战术训练可实现任意路径的行走。

1) 在线示教通过遥控器或键盘远程操作机器人战术靶行走，构建基于行驶距离和转弯半径的路径点采样策略；

2) 离线示教通过上位机软件对地图文件进行编辑，通过定义一系列离散的路径点和相邻点之间的行走模式(点跟踪、直线跟踪、曲线跟踪)和跟踪速度来完成路径的绘制；

3) 路径再现阶段读取之前存储的示教路径，采用节点跟踪切换控制策略、速度分段控制策略、基于航向和偏距组合误差的方向控制策略来控制机器人对路径的跟踪；