

# 基于大数据聚类的移动机器人运动跟踪控制系统设计

卞悦旭, 倪伟, 王展旭

(青岛科技大学 机电工程学院, 山东 青岛 266061)

**摘要:** 传统的移动机器人运动跟踪控制系统控制过程易受到外界扰动影响, 导致控制稳定性及运动跟踪准确性较差, 为此提出基于大数据聚类的移动机器人运动跟踪控制系统; 硬件部分主控制器负责远程无线通讯及采集到图像数据的传输; 驱动控制器负责为机器人行走提供动能保证; 远程控制模块负责数据、图像及指令的传输; 舵机控制模块负责机器人的行走、转向; 软件部分首先通过大数据聚类的方法分析机器人移动步态, 根据运动超声波传感器原理判定障碍物位置; 考虑移动机器人的运行状态与足端轨迹, 构建机器人行走控制模型; 通过髋关节调节机器人姿态, 消除外部扰动对机器人姿态和运动速度的影响, 实现移动机器人运动跟踪控制系统设计; 实验结果表明, 所设计系统控制下机器人运动角速度变化波动范围在 $-15\sim 10$  rad/s之间, 运动轨迹跟踪控制的准确率平均值为96%, 对机器人运动控制的稳定性及对抗外界扰动方面具有较好的性能, 能够实现对移动机器人运动的准确跟踪。

**关键词:** 大数据聚类; 移动机器人; 运动跟踪; 跟踪控制; 足端轨迹; 避障控制

## Design of Mobile Robot Motion Tracking Control System Based on Big Data Clustering

BIAN Yuexu, NI Wei, WANG Zhanxu

(School of Mechanical Engineering, Qingdao University of Science and Technology, Qingdao 266061, China)

**Abstract:** Motion tracking control system for traditional mobile robot is easy to be affected by external disturbances, which leads to poor control stability and tracking accuracy, so the motion tracking control system based on big data clustering is proposed. The main controller of hardware is responsible for remote wireless communication and transmission of image data, the driving controller is responsible for providing kinetic energy for walking robot, the remote control module is responsible for transmission of data, image and instruction, and the steering gear control module is responsible for robot to walk and turn. In the software part, the gait of mobile robot is analyzed by the method of big data clustering, and the position of obstacle is determined by the principle of motion ultrasonic sensor. Considering the running state and trajectory of mobile robot, the walking control model is constructed. The motion tracking control system of mobile robot is designed by adjusting the robot's attitude through the hip to eliminate the influence of external disturbance on robot's angular velocity. The experimental results show that the average accuracy of trajectory tracking control is up to 96%. The proposed control system has good performance in stability of robot motion control and anti-disturbance, and the accurate motion tracking for mobile robot is verified.

**Keywords:** big data clustering; mobile robot; motion tracking; tracking control; foot trajectory; obstacle avoidance control

## 0 引言

近年来, 机器人产业高度发展, 在工业、服务、灾后救援等方面的应用越来越广泛。机器人能够机械化地完成系统设定的任务, 相比较于人工其完成过程效率更高、准确性更好。但是机器人执行任务时会遭遇各种路况和情景, 容易出现卡死或侧滑摔倒等情况, 所以对移动机器人的运动过程进行跟踪控制就变得尤为重要<sup>[1-2]</sup>。

当前已有相关领域学者对移动机器人运动跟踪控制作出了研究。文献 [3] 提出以 CoDeSys 为核心的全方位移动机器人控制系统。根据机器人位置和航向偏差构造 Lyapunov 函数, 利用运动学反演、牵引轮、方向盘等约束条件对车辆速度进行规划, 优化跟踪控制系统; 文献 [4] 提出基于质心偏移的移动机器人轨迹跟踪控制方法, 利用虚拟反馈变量分析控制系统在各方向的稳定性, 利用指数逼近

收稿日期: 2021-08-12; 修回日期: 2021-10-26。

作者简介: 卞悦旭(1996-), 男, 山东烟台人, 硕士研究生, 主要从事虚拟控制工程技术方向的研究。

通讯作者: 王展旭(1962-), 男, 山东济宁人, 博士, 教授, 主要从事页岩油气增产与稳产工程应用技术方向的研究。

引用格式: 卞悦旭, 倪伟, 王展旭. 基于大数据聚类的移动机器人运动跟踪控制系统设计[J]. 计算机测量与控制, 2022, 30(4): 86-90, 120.

率降低滑模变结构控制的抖动, 从而设计线速度和角速度控制律, 实现参考轨迹的跟踪。

综上所述, 本文基于大数据聚类法提出移动机器人运动跟踪控制系统, 针对系统的硬件和软件进行优化设计, 系统硬件主要设计了远程控制模块和舵机控制模块, 软件部分通过大数据聚类实现分析步态、障碍物过程、行走控制, 实现对移动机器人的运动跟踪控制。

### 1 移动机器人运动跟踪控制系统硬件设计

本文设计的移动机器人运动跟踪控制系统硬件包括主控制器、驱动控制器、远程控制模块、舵机控制模块及电源模块五部分。系统的硬件结构如图 1 所示。

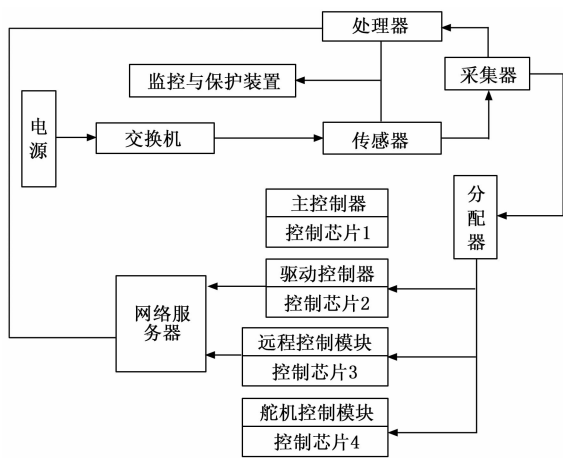


图 1 移动机器人运动跟踪控制系统硬件结构

#### 1.1 主控制器

移动机器人主控制器设计 30 个 I/O 端口, 用于按键、避障模块的连接。主控制器结构如图 2 所示。

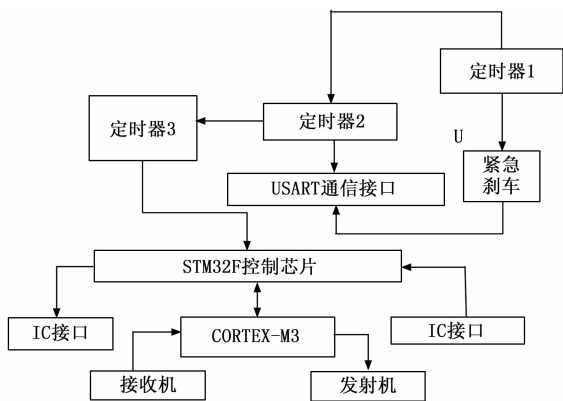


图 2 主控制器结构

由图 2 可知, 本文研究的主控制器结构主要由定时器、通信接口、控制芯片等组成。3 个定时器, 用于直流电机的驱动和机器人姿态保持控制, 4 个 USART 通信接口, 用于远程无线通讯, 图像采集的数据传输和舵机驱动连接。选用 STM32F 芯片, 其性能强劲, 满足基本的控制需求, 芯片内部集成元件丰富, 功耗低, 工作频率可达到 10 MHz,

同时支持外接 USB 扩展。芯片集成有 512 字节的闪存和 64SRAM 的临时储存, 11 个多功能双向 I/O 按键端口; 2 个 16 位紧急刹车, 4 个 16 位定时器; 2 个 IC 接口, 5 个 USRAT 接口和 5 个 CAN 接口用于通讯<sup>[5-6]</sup>。控制器电路如图 3 所示。

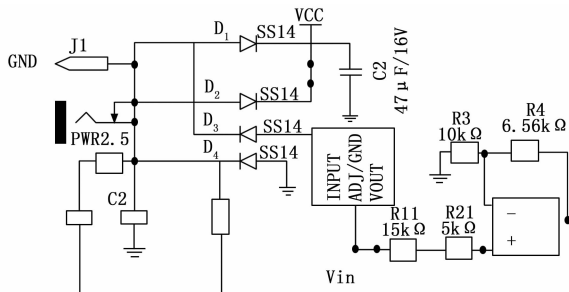


图 3 控制器电路图

#### 1.2 驱动控制器

主控制器无法直接驱动移动机器人, 因此需要驱动模块控制直流电机输出更大的转矩, 支持机器人的移动, 为机器人的运动提供动能保证。机器人移动过程中两侧主动驱动电机同时工作, 分别控制机器人移动的速度和方向。驱动控制器电路如图 4 所示。

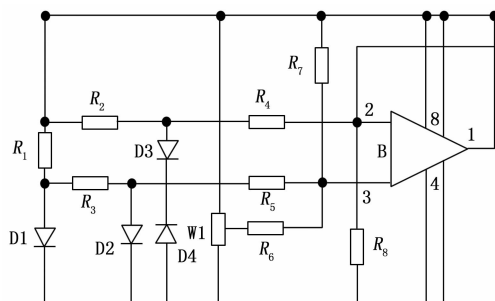


图 4 驱动控制器电路图

观察图 4 可知, 电机驱动控制器通常内置桥型电路, 一组电路能够很好地控制电机工作状态, 另一组电路通过三极管来对电机的翻转进行控制。当电机产生励磁时, PWM 脉冲的占空比也会变化, 电机的速度能够得到有效控制<sup>[7-8]</sup>。

驱动控制器选择 DBH-01 型双路驱动器, 该驱动器的刹车功能表现稳定, 且可匹配不同速度, 使用多种控制场景, 采用光耦隔离能够最大程度地减少外界干扰。工作电压固定在 6~10 V, 设定电机的极限电压是 15 V。输出通道如图 5 所示。

观察图 5 可知, 2 路输出通道作为直流电机驱动接口, 单路接口最大可输出电流为 25 A, 能够很好地满足大转矩的移动需求。控制信号电压为 0~8 V, 兼容 3 V、4 V、6 V 驱动器, 励磁脉冲占空比范围为 0~95%, 极限值为 97%。

#### 1.3 远程控制模块

当机器人移动场景较为复杂时, 可人工干预通过手动

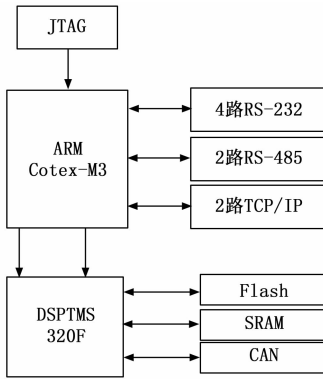


图 5 输出通道

操作控制机器人，这就需要运用远程控制技术，通过无线通讯，图像传输和上机位指令可以远程控制机器人完成多方向移动等复杂动作。无线通讯是上机位与机器人远程连接的重要纽带，机器人的终端数据，图像及上机位传达得到指令都是通过无线通讯系统实现的。

无线通讯模块采用 LoRa 扩展芯片，工作频率为 850 MHz，功率为 900 mW，搭载扩展天线，其最大通讯距离可达 2 500 m。图像传输模块采用 AOMWAY 无线图传，搭载高清 150° 广角镜头，清晰度为 1 080 p，接收灵敏度高达 95%。上机位模块由控制面板和操作台两部分组成，面板输入控件为人机交互窗口，操作者将设定参数输入后，面板输出控件负责模拟机器人的实时姿态。操作部分主要功能为通过串口参数调节，数据传输速率，指令发送等，设定机器人移动的坐标点，完成对机器人的控制<sup>[9-12]</sup>。

#### 1.4 舵机控制模块

机器人移动需要两个关节同时工作，协同控制机器人的行走部件，若要控制机器人前行，转向，还需要在行走部件安装伺服舵机<sup>[13-14]</sup>。UART 的双工单线通讯的伺服舵机，工作频率为 890 MHz，波特率达到 11 000，允许串联和并联混合方式工作，有 5 种工作模式，当电机连续转动时为轮子模式，此时舵机可作为减速电机使用。当电机锁死时，静止的舵机会产生阻抗，锁死模式可确保舵机不会因外力产生范围外的扭矩。舵机控制模块结构如图 6 所示。

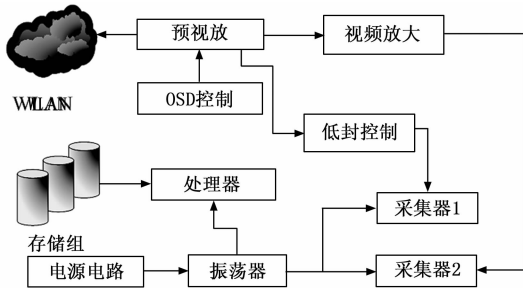


图 6 舵机控制模块结构图

当外力扭动时，舵机依据转动速度不同给出不同的抵抗力，外力越大，速度越大，抵抗力就越大，这种工作模

式为阻尼模式<sup>[15]</sup>。外力可随时扭动舵机，舵机对外呈现掉电状态，此时为待机模式。舵机指定一个电流，舵机朝给定方向转动，且保持电流不超过给定值，此时为力矩控制模式。通过对以上几种运动模式对比，选择将私服舵机设置为阻尼模式，该模式可以确保舵机不会在某一位置被锁定，且输出阻力能够维持机器人的运动稳定性，外力干扰越大时，对外阻力越大，可以充分保证机器人在阻力下的运动姿态。舵机最高转速为 0.4 s/60°，额定电压 6.5 V，串口总线通讯方式<sup>[16]</sup>。

#### 1.5 电源模块

考虑到移动式机器人运动场景多样，时间较长，电源模块需要选用续航时间长，且安全性高的锂电池，且锂电池体积更小，安装及更换都较为方便。锂电池电压为 45 V，为保证机器人移动的稳定性，要设置比额定电源容量稍大一些电源。稳压器将 45 V 电源降压处理后得到 20 V 稳定电压，用于驱动直流电机，图像采集；再通过芯片 LM317 降压，得到 6 V 稳定电压，用于舵机电源，最后经过 LM1117 芯片降压得到 3.5 V 稳定电压。

### 2 基于大数据聚类的移动机器人运动跟踪控制系统软件设计

在设计了上述硬件模块的基础上，设计移动机器人运动跟踪控制系统的软件程序。

#### 2.1 基于大数据聚类的机器人步态分析

对移动机器人步态大数据进行优化聚类<sup>[17]</sup>，构建步态大数据分布式结构模型，设定有限数据集为：

$$B = \{b_1, b_2, \dots, b_n\} \quad (1)$$

式 (1) 中，B 表示为有限数据集；n 表示移动机器人步态大数据分布式结构模型中包含的样本个数；在步态大数据分布式结构模型中构建模糊控制迭代函数，使数据的聚类中心得到收敛：

$$y(b) = \frac{\tau}{\exp|-x \cdot \text{sgn}(b)|} \quad (2)$$

式 (2) 中，τ 为聚类信道拟合因子；x 为大数据聚类的迭代次数；sgn 表示为符号函数。对步态数据进行非线性时变的线性调频控制信号模拟，提取数据特征：

$$T(b) = \sum [y(b) - (c_i, d_i)]^2 \quad (3)$$

式 (3) 中，y(b) 表示为特征点函数；(c<sub>i</sub>, d<sub>i</sub>) 表示大数据信息流的二维特征位移；通过公式 (3) 完成特征值拟合，实现数据的优化聚类。

移动机器人由机身和 4 条腿组成，每条腿具有 3 个运动关节，以机身中心为原点建立坐标系 {O}，将垂直于机身躯干方向定义为 z 轴，将垂直于 z 轴方向定义为 x 轴方向，设定坐标系 {O}，从而获得移动机器人腿足端坐标 (x, y, z) 为：

$$\begin{cases} x = -a_1 s_1 - a_2 s_{12} + \delta l \\ y = a_0 s_0 + a_1 s_c c_1 + a_2 s_0 c_{12} + \lambda a \\ z = -a_0 c_c - a_1 c_0 c_1 - a_2 c_0 c_2 - h \end{cases} \quad (4)$$

其中:  $\delta$  代表的是额定值, 设定  $\delta = \begin{cases} 1 \\ -1 \end{cases}$ ; 设置符号变量  $a_1$ , 通过  $a_1$  表示移动机器人前腿的取值;  $a_2$  表示移动机器人的后退取值。利用公式 (4) 得到矩阵  $J$ :

$$J = \begin{bmatrix} 0 & -a_0c_1 - a_2c_{12} & -a_2c_{12} \\ c_r(a_1 + a_1c_1 + a_2c_{12}) & s_1(a_1s_1 + a_2s_{12}) & -a_2s_1s_{12} \\ s_0(a_a + a_1c_1 + a_2c_{12}) & c_1(a_1s_1 + a_2s_{12}) & a_2s_0s_{12} \end{bmatrix} \quad (5)$$

通过矩阵  $J$  的转置可以计算出移动机器人各个关节的输出扭矩。其中,  $a_0$ 、 $a_1$ 、 $a_2$  分别表示 3 个关节扭矩,  $s$  为矩阵满秩, 移动机器人能够从 3 个方向输出, 确保受到的力量是均匀的, 同时保证力道可以控制<sup>[18]</sup>。

### 2.2 基于大数据聚类的机器人障碍设计

障碍物距离测量通常采用超声波原理, 在测量超声信号发射时间的过程中, 确定传播速度  $v=360 \text{ m/s}$ , 计算传播速度障碍物与机器人间的距离  $S$ :

$$S = \frac{340t}{2} = 170t \quad (6)$$

单个超声波传感器通过上式可以粗略确定障碍物与机器人的距离, 若要更精确地判定障碍物位置还需要多个超声波传感器同时工作, 当某个障碍物被两个超声波传感器检测到时, 设超声波传感器的位置分别为  $A$ 、 $B$ , 障碍物位置为  $O$ , 建立如图 7 所示的三角测量信息坐标系。

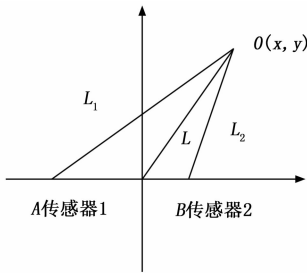


图 7 三角测量信息坐标系

设其中  $O$  点的坐标为  $(x, y)$ , 由勾股定理可得到:

$$\begin{cases} (x-a)^2 + y^2 = L_2^2 \\ (x+a)^2 + y^2 = L_1^2 \end{cases} \quad (7)$$

求解可以得到:

$$\begin{cases} x = \frac{L_1^2 - L_2^2}{4a} \\ y = \sqrt{L_2^2 - \frac{(L_1^2 - L_2^2 - 4a^2)^2}{4a^2}} \end{cases} \quad (8)$$

则障碍物  $O$  点距离机器人距离  $L$  和方位为:

$$\begin{cases} \arctan\theta_0 = \frac{y}{x} \\ L = \sqrt{x^2 + y^2} \end{cases} \quad (9)$$

### 2.3 移动机器人行走控制流程设计

移动机器人行走步态迈步顺序如图 8 所示。

根据移动机器人运行速度和躯干姿态将腿式运动构建

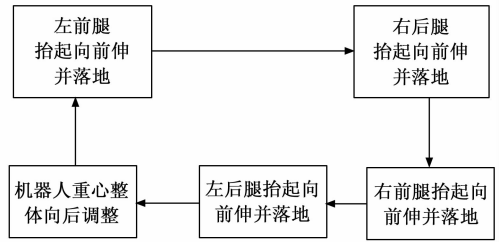


图 8 移动机器人行走步态迈步顺序

简化模型, 考虑到移动机器人运行状态与足端轨迹, 进一步将机器人实际运动状态等效为虚拟模型, 通过虚拟模型等效求解出每个移动机器人每个关节运动所需的扭矩<sup>[19-21]</sup>。

外部干扰会造成机器人运动失衡, 对于姿态扰动和速度扰动, 可通过髋关节调节机器人姿态, 对异常的运动进行抑制, 进而消除外部扰动对机器人姿态和运动速度的影响, 抗扰动控制模型如图 9 所示。

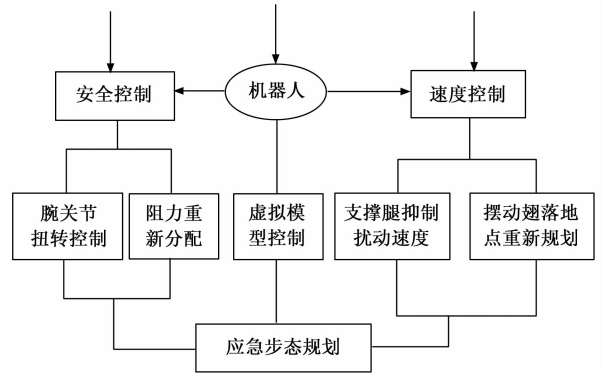


图 9 抗扰动控制模型

机器人行走遇到障碍物时, 会造成脚部运动延迟, 当另外三只脚着地时, 第四只脚悬空会导致机器人失去平衡, 对于这类问题, 可以增加支撑来达到机器人的稳定状态, 引入步态时序规划, 将控制指令同时下发到两只脚, 此时为对角支撑状态, 此时需要第 3 种支撑来维持动态平衡, 设计逻辑如图 10 所示。

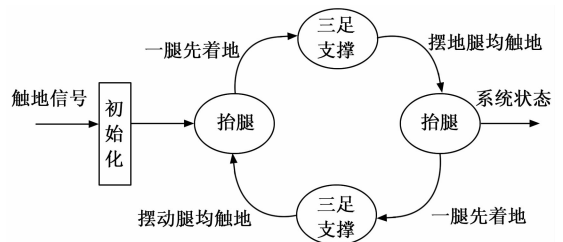


图 10 设计逻辑图

在这样的对角步态下, 每只脚独立运动, 步态时序调整范围大, 不会因为延迟造成机器人行走状态失衡, 每条腿的运动相互独立, 机器人 4 只脚步态顺序如图 11 所示。

### 3 实验研究

为验证所设计基于大数据聚类的移动机器人运动跟踪

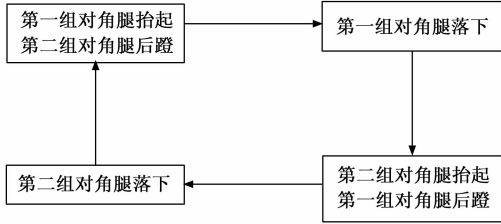


图 11 机器人 4 只脚步态顺序

控制系统的有效性，设计仿真对比实验。实验采用文献 [3] 方法、文献 [4] 方法作为实验对比方法，在 Simulink 仿真软件中对移动机器人运动跟踪稳定性及抗扰动控制性能进行测试。

### 3.1 实验参数及方法

在 Simulink 仿真软件中构建移动机器人模型，设置机器人参数如表 1 所示。

表 1 机器人参数

参数	数值
最大牵引速度/(m/s)	0.59
最大转向速度/(rad/s)	0.91
平均加速度/(m/s <sup>2</sup> )	0.50

在表 1 机器人参数设置的基础上，设置机器人运动步态迈步顺序为：左前脚、右后脚，右前脚，左后脚。左前脚迈步到右后脚迈步段机器人前进 1.5 m。分别采用 3 种控制系统对移动机器人的运动进行跟踪控制，测试其跟踪控制准确性。

### 3.2 运动跟踪实验

分析 3 种控制系统对机器人运动稳定性的控制效果。3 种控制方法下，以机器人为圆心的角速度变化如图 12 所示。

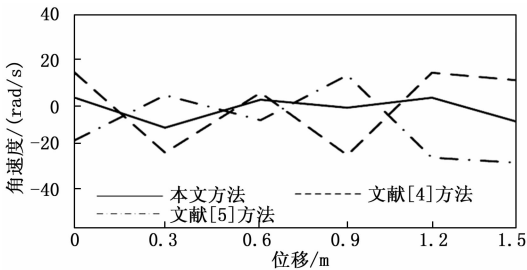


图 12 角速度变化稳定性实验结果

从图 12 可以看出，文献 [4]、文献 [5] 方法控制下机器人运动的角速度变化波动较大，而基于大数据聚类的控制系统的机器人运动角速度变化波动较小，范围在 -15~10 rad/s 之间，且波动稳定性较好，表明该控制系统对机器人运动控制的稳定性更好。本文系统利用大数据聚类方法对移动机器人步态大数据进行优化聚类，通过超声波原理计算障碍物距离，实现机器人避障控制，因此机器人运动稳定性控制效果较好。

### 3.3 抗扰动控制实验

当机器人对角步态运动并受到撞击时，会因外界扰动而造成机器人运动失稳。运用不同的运动跟踪控制系统对机器人撞击时的运动状态进行对比实验，设置机器人运动时间为 70 s，分别在机器人运动的第 10、30、60 s 以俯仰角度撞击机器人，分析机器人运动跟踪控制的轨迹，得到跟踪控制准确性如图 13 所示。

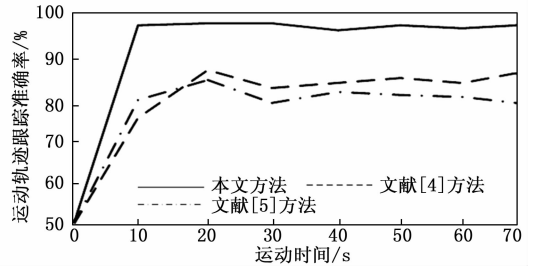


图 13 跟踪控制准确性示意图

从图 13 可以看出，文献 [4] 方法的运动轨迹跟踪控制的准确率平均值为 85%，其在第 10、30、60 s 的跟踪准确性均低于平均值；文献 [5] 方法的运动轨迹跟踪控制的准确率平均值为 83%，其在第 10、30、60 s 的跟踪准确性均低于平均值；本文方法的运动轨迹跟踪控制的准确率平均值为 96%，其在第 10、30、60 s 的跟踪准确性均未受到撞击扰动的影响，与平均值相差不超过 1%。由此可见本文方法的跟踪控制准确性更好。

### 4 结束语

本文设计了基于大数据聚类的移动机器人运动跟踪控制系统，硬件方面设计了主控制器、直流电机控制器、远程控制模块、电源模块，软件方面通过大数据聚类对机器人的运动步态分析，设计图像传输和远程通信流程实现障碍物规避，将机器人运行速度和姿态虚拟为运动模型，通过髌关节调节消除外部扰动，构建出抗干扰模型，进而实现移动机器人运动跟踪控制。实验结果表明所设计机器人运动跟踪控制系统的稳定性较好，能够准确跟踪控制机器人运动轨迹，提升移动机器人的应用性能。

#### 参考文献：

[1] 匡文龙, 沈文龙, 姬长英, 等. 农用履带机器人轨迹跟踪控制系统设计与试验 [J]. 东北农业大学学报, 2020, 51 (4): 78-87.

[2] 赵 涛, 王屹华. 轮式移动机器人全局轨迹跟踪控制 [J]. 微电机, 2020, 53 (1): 111-112, 116.

[3] 徐建明, 赵亚楠, 吴蜀魏, 等. 基于 CoDeSys 的全向移动机器人控制系统设计 [J]. 浙江工业大学学报, 2019, 47 (2): 230-236.

[4] 王申全, 谢咚咚. 基于质心偏移的移动机器人轨迹跟踪控制 [J]. 机床与液压, 2019, 47 (15): 20-24.

(下转第 120 页)