

基于偏微分方程约束的机器人 群集运动控制系统设计

董 慧

(西安明德理工学院 通识教育学院, 西安 710124)

摘要: 为充分发挥机器人集群的协作优势, 克服单机器人能力不足问题, 利用偏微分方程约束理论, 设计机器人集群运动控制系统; 扩大机器人集群间通信网络范围, 改装机器人传感器、运动控制器和驱动电机设备; 在硬件设备的支持下, 考虑机械结构、运动与动力工作原理, 建立机器人集群数学模型; 分配机器人集群运动任务, 利用偏微分方程规划机器人集群编队运动路径, 设置规划路径作为机器人集群运动的约束条件; 从位置和姿态角两个方面计算运动控制量, 通过控制指令的生成与转换, 实现系统的机器人集群运动控制功能; 通过系统测试实验得出结论: 与传统运动控制系统相比, 在优化设计系统的控制下, 机器人集群的运动跟踪控制误差为 13 cm, 机器人集群运动过程中产生的碰撞次数平均值为 15 次, 得到明显减少, 即优化设计系统具有良好的控制效果。

关键词: 偏微分方程; 控制约束; 机器人运动; 群集运动控制

Design of Robot Cluster Motion Control System Based on Partial Differential Equation Constraints

DONG Hui

(College of General Education, Xi'an Mingde Institute Of Technology, Xi'an 710124, China)

Abstract: In order to make full use of the cooperative advantages of robot clusters and overcome the problem of insufficient capacity of single robot, a robot cluster motion control system is designed by using the constraint theory of partial differential equations. The system expands the range of communication networks between the robot clusters, and refits the robot sensors, motion controllers, and driving motor equipment. With the support of hardware equipment, considering the mechanical structure, motion and dynamic working principle, a mathematical model of robot cluster is established. The task of robot cluster movement is assigned, and the path of robot cluster formation movement is planned by using the partial differential equations, and the planned path is set as the constraint condition of the robot cluster movement. The motion control quantity is calculated by the position and attitude angle, and the cluster motion control function of the system is realized through the generation and conversion of control commands. Through the system test experiment, it is concluded that compared with the traditional motion control system, under the control of the optimized design system, the motion tracking control error of the robot cluster is 13 cm, and the average number of collisions generated during the robot cluster movement is 15, which is significantly reduced, that is, the optimized design system has a good control effect.

Keywords: partial differential equation; control constraints; robot movement; cluster motion control

0 引言

机器人可以从许多不同的角度协助或取代人类, 完成危险的工作。在人工智能理论以及控制理论不断发展和成熟的大背景下, 机器人的工作范围和复杂性也越来越高, 但人们对机器人提出了更多新的要求, 而单个机器人能力难以满足这些新的应用需求^[1]。为此提出了多个独立机器人相互协调合作的工作模式, 即形成机器人集群, 使其共同完成给定的任务。相对于单一机器人, 机器人集群可以实现一些单一机器人无法完成的工作, 因此在完成任务时可能具有更高的效率。

鉴于机器人集群在工作性能方面的优势, 目前机器人集群已经应用到军事、工业生产、交通控制等领域, 且具有良好的应用前景。然而机器人集群在实际的应用与运行过程中, 集群中的机器人会相互碰撞, 影响机器人集群的运动效果以及工作效率。为了保证机器人集群的高效运动, 设计并开发了机器人集群运动控制系统。机器人集群运动控制是指在控制指令的驱动下, 通过执行元件或电机的运行调整单一机器人的运动参数, 使机器人集群能够按照既定方案执行运动任务。

从现阶段机器人集群运动控制系统的设计与应用情况

收稿日期: 2022-12-09; 修回日期: 2023-01-12。

基金项目: 高等学校大学数学教学研究与发展中心 2022 教学改革项目(CMC20220508)。

作者简介: 董 慧(1984-), 女, 陕西西安人, 硕士, 讲师, 主要从事信息与计算科学、计算数学、数学建模方向的研究。

引用格式: 董 慧. 基于偏微分方程约束的机器人集群运动控制系统设计[J]. 计算机测量与控制, 2023, 31(4): 130-135.

来看，当前相关领域学者已经研究出了较为成熟的控制系统。文献 [2] 提出基于输出反馈线性化的运动控制系统主要应用于单一机器人的运动控制工作中，将其应用到机器人集群的控制工作中，存在部分机器人无法控制的情况，最终影响系统的控制效果。文献 [3] 提出基于领航跟随的运动控制系统主要是控制机器人集群中的主机器人，在此基础上采用跟随模式控制从机器人，保证从机器人与主机器人的运动参数与路径一致，因此该系统只能应用于重复操作的运动任务中，在应用范围上存在一定的局限性。为了解决上述运动控制系统存在的问题，引入偏微分方程约束理论。

偏微分方程是指未知函数的偏导数或者偏微分的方程。在客观环境下，偏微分方程可以表达为时间坐标和变化规律，往往表现为关于时标的各阶变化率之间的关系式。偏微分方程约束理论的工作内容就是根据时标的各阶变化率之间的关系设置约束条件。本文首先通过改装机器人传感器、运动控制器和驱动电机设备，优化了机器人集群运动控制系统硬件设备。在此基础上将偏微分方程约束理论应用到机器人集群运动控制系统的优化设计工作中，将规划路径作为机器人集群运动的约束条件，以位置和姿态角来计算运动控制量，根据计算结果生成控制指令，实现机器人集群运动控制系统设计。

1 机器人集群运动控制系统硬件设计

机器人集群运动控制系统硬件主要包括通信网络、传感器、运动控制器、驱动电机，硬件整体的组成如图 1 所示。

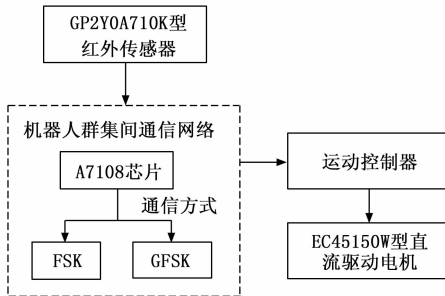


图 1 硬件整体组成框图

如图 1 所示，机器人集群运动控制系统的硬件由通信网络相连，通过 GP2Y0A710K 型号红外传感器获取机器人的位置信息和运行参数信息，通过通信网络将信息传输至运动控制器，由运动控制器实现计算机器人的位置信息的任务，再将控制信息传输至运动驱动电机，生成不同方向的驱动信号。

1.1 机器人集群间通信网络

通信在多机器人系统的研究中有着重要的作用，借助通信可以获取任务需求、环境信息和邻居状态等，为了提高机器人集群的运动控制效果，通过局部通信来扩大感知范围。在传统通信网络的基础上，将射频芯片替换成 A7108，以该芯片为核心部件的通信网络的数据传输速度支

持 2~250 kbps，支持 FSK 和 GFSK 两种通信方式，在 10 kbps 的工作条件下，其通讯距离能够达到 1 600 m。A7108 芯片除具备远程传送功能外，还具有检测通道及晶片内部机制的功能，可有效克服半导体制程的变异特性，使其能够在各种恶劣环境下工作，有效地解决因射频频偏而引起的灵敏度下降问题。

1.2 机器人传感器

在各个机器人上安装传感器的目的是获取机器人的位置信息和运行参数信息，从而确定当前机器人的初始状态。控制系统中装设的位置传感器为红外传感器，型号为 GP2Y0A710K，该设备不仅能够确定机器人在环境空间中的实时位置，也能够利用红外信号来分辨方向。系统中的红外传感器由发射头和接收头构成，其中接收头内包括内置的增益控制电路、解码电路和带通滤波器。系统中红外传感器的工作电路如图 2 所示。

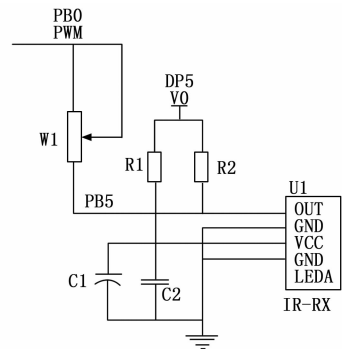


图 2 系统红外传感器工作电路图

在运行过程中，发射端可以发出红外线的频率，当红外线碰到障碍时，会被反射回去，而红外线会被红外线接收，而处理器则会根据红外线接收器的电压变化，判断出机器人和障碍物的距离。

1.3 机器人集群运动控制器

机器人集群运动控制系统以控制器作为执行元件，用来生成运动控制任务，同时完成协同通信、实时解算控制数据等功能。另外要求安装的运动控制器需要有精确、稳定地控制时间频率，以保证跟随运动精度^[4]。为满足上述要求，在传统运动控制器的基础上进行改装，改装的运动控制器内部结构如图 3 所示。

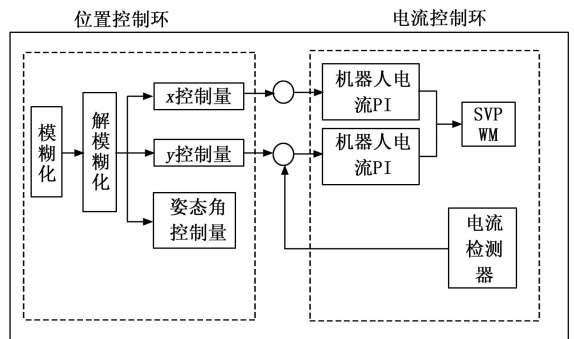


图 3 机器人集群运动控制器内部结构图

从图 3 中可以看出, 机器人集群运动采用位置、速度、电流驱动并行控制方式, 位置控制采用 PID 控制, 而速度和电流驱动采用 PI 控制^[5]。此外, 在运动控制器中嵌入复位器、低电压检测等的集成电路, 用以支持实时解算控制数据等功能的运行。

1.4 机器人运动驱动电机

在移动机器人的运动中, 通过传感器的反馈, 可以随时调节电机的转速。在接收到传感器的反馈信息之后, 主控芯片会根据输出电压和输出电流的误差, 计算出输出电压^[6]。机器人的运动驱动装置是 EC45150W 型直流驱动电机, 其输入端可以与主控芯片相连, 这样就可以很方便地进行控制。图 4 为机器人运动驱动电机的驱动电路。

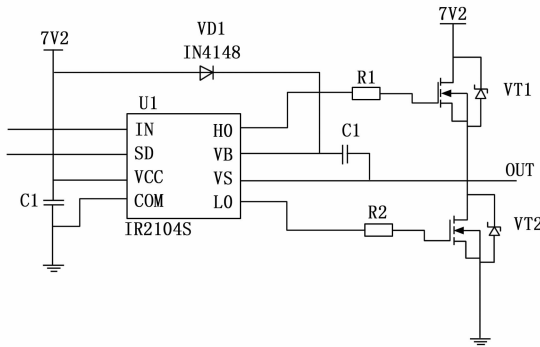


图 4 机器人运动驱动电路图

启动驱动电机后, 通过改变输入端 IO 口的逻辑电平, 即可实现电机正转和反转的切换, 从而生成不同方向的驱动信号。最终利用通信网络连接驱动电机、传感器与控制, 并将其接入到供电电源中。

2 机器人集群运动控制系统软件功能设计

在硬件设备的支持下, 通过确定机器人集群运动控制逻辑以及控制程序编写等步骤, 完成系统的软件设计^[7]。优化设计系统采用集中式控制方式, 即具有完整信息和绝对控制权的中央处理器。集中式控制方式是由上至下的分层体系, 由规划和决策组成。在具体的实施中, 中心处理器对各个独立的个体进行数据的分析, 制定出一个整体的计划方案, 然后再向机器人集群中的各个机器人发出指令。

2.1 建立机器人集群数学模型

机器人集群由多个单一机器人组成, 机器人集群可以量化表示为:

$$U = \{u_i \mid 1 \leq i \leq n_{robot}\} \quad (1)$$

其中: n_{robot} 为机器人集群中单一机器人的数量, 组成集群的机器人可能是同构的, 也可能是异构的。机器人之间保持通信交互, 在任一时刻任意两个机器人之间的位姿关系可以表示为:

$$\begin{cases} x_j = x_i + d_{ij} \cdot \cos(\varphi + \theta_i) \\ y_j = y_i + d_{ij} \cdot \sin(\varphi + \theta_i) \end{cases} \quad (2)$$

式中, x_i, y_i 和 θ_i 代表机器人 i 的当前位置和姿态角, d_{ij} 为两机器人之间的间隔距离, φ 表示的是机器人 j 的偏转角^[8]。

为了保证系统能够对机器人集群中的所有机器人设备进行精准控制, 需要在执行控制任务前对集群中的各个机器人进行匹配。依据 Euler-Lagrangian 原理, 将单一机器人的动力学模型建立为:

$$M(q) + R(q, \dot{q}) + G(q) = \delta + I(q)\gamma \quad (3)$$

式中, $M(q)$ 和 $I(q)$ 对应的是机器人的惯性矩阵和输入矩阵, $R(q, \dot{q})$ 和 $G(q)$ 分别为单一机器人的科里奥利矩阵和中心向量, δ 和 γ 表示的是拉格朗日乘子和输入转矩。最终将多机器人组成结构、运动特征以及动力学建模结果进行融合, 得出机器人集群数学模型的建立结果。

2.2 分配机器人集群运动任务

假设机器人集群待执行的运动任务集合为 W , 其量化表达式如下:

$$W = \{\tau\omega_k \mid 1 \leq k \leq n_{task}\} \quad (4)$$

其中: n_{task} 为运动任务数量。根据运动任务的优先与重要程度, 对每个运动任务进行加权, 任意运动任务的权值标记为 $\bar{\omega}_k$ 。那么机器人集群的运动任务分配问题可以描述为:

$$\xi = \max \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^n g_{ik} \psi_{ik} \bar{\omega}_k \quad (5)$$

式中, 变量 g_{ik} 为需要求解的任务分配结果, ψ_{ik} 为机器人对于运动任务的效用值^[9]。

2.3 利用偏微分方程规划机器人集群编队运动路径

机器人集群编队运动路径的规划大体可以分为 4 个步骤, 分别为机器人定位、障碍物检测、机器人集群编队以及运动路径生成与平滑处理, 在路径轨迹生成阶段利用偏微分方程来反映机器人的实际环境信息, 从而得出更符合实际环境的路径规划结果^[10]。假设函数 h 在区域 Z 内具有方程中出现的各阶连续偏导数, 把 h 代入到 Z 区, 若 h 能够将 Z 区转换为恒等式, 则 h 为 Z 区方程的解。在 $n+1$ 维中, h 为方程的积分曲面。将机器人集群的运动规律用偏微分方程来表示, 其数学表达式如下:

$$f(x, y, t) = \frac{\partial^2 h}{\partial t^2} - \beta^2 \left(\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} \right) \quad (6)$$

式中, t 为机器人集群的运动时间, β 为偏微分系数。在实际的路径规划过程中可用从起点到终点波动的二维方程描述^[11]。利用硬件系统中的传感器设备, 确定机器人的当前位置信息, 机器人初始位置的定位结果可以表示为:

$$\begin{cases} x_0 = x_{Known} + v_{infra-red} \Delta t \cos \vartheta \\ y_0 = y_{Known} + v_{infra-red} \Delta t \sin \vartheta \end{cases} \quad (7)$$

其中: (x_{Known}, y_{Known}) 为运动环境中的已知节点位置坐标, $v_{infra-red}$ 为传感器产生红外信号在环境中的传输速度, Δt 代表信号的传送时间, ϑ 为机器人位置与已知节点位置之间的夹角^[12]。在此基础上, 根据机器人集群运动任务的分配结果, 确定机器人集群的编队方案。根据机器人集群的编队结果, 确定编队运动路径的终点位置, 机器人当前位置与编队运动终点位置之间的连线即为机器人集群运动的初始路径^[13]。利用式 (8) 计算机器人集群初始编队运动路径与运动环境中障碍物的重合度。

$$\eta_{\text{coincidence}} = \sqrt{\left(\frac{x_{\text{obstacle}}}{x_i}\right)^2 + \left(\frac{y_{\text{obstacle}}}{y_i}\right)^2} \quad (8)$$

式中, i 表示的是初始运动路径上的任意一点, $(x_{\text{obstacle}}, y_{\text{obstacle}})$ 为机器人运动环境中障碍物的位置坐标。若运动环境中存在的障碍物数量不为 1, 则需要对重合度进行一一匹配^[14]。若初始路径中的节点与障碍物之间的重合度趋近于 1, 则认为障碍物处于规划的初始路径上, 需要对路径上重合节点的位置进行调整, 调整结果如下:

$$\begin{cases} x_{i,\text{new}} = x_i + \epsilon_{x0} \\ y_{i,\text{new}} = y_i + \epsilon_{y0} \end{cases} \quad (9)$$

式中, ϵ_{x0} 和 ϵ_{y0} 为位置调整系数。按照上述方式对初始路径上的所有节点进行检测与调整, 根据路径节点与初始节点之间的距离, 依次连接路径节点, 完成路径的更新工作^[15]。最终对更新的运动路径进行插补处理, 得出机器人的运动步长和步数为:

$$\begin{cases} L_{\text{step}} = v_{\text{Give}} T_{\text{interpolation}} \\ N_{\text{Steps}} = \frac{|P_s P_e|}{L_{\text{step}}} \end{cases} \quad (10)$$

其中: v_{Give} 和 $T_{\text{interpolation}}$ 分别为机器人的给进速度和插补周期, P_s 和 P_e 为更新路径的起点和终点。 N_{Steps} 取整后确定步长的具体取值。按照上述方式对机器人集群中的所有机器人的路径规划结果。

2.4 设置机器人集群运动约束条件

在偏微分方程约束理论支持下, 将机器人集群的实时位置作为机器人集群运动约束条件, 保证机器人位置始终处于区间 $[P_i - 0.5, P_i + 0.5]$ 内。通过积分、微分运算, 把它转化为有约束的对象在真实的空间中的位置^[16]。根据全约束体系的特点, 可以将其转换成具有较高阶的非约束体系, 从而使整个约束体系的研究和应用更为精确和完善。另外设置机器人集群运动控制的完整性约束条件为:

$$\varphi(\zeta, t) \geq 0 \quad (11)$$

其中: ζ 为机器人在空间运行时自身的姿态, $\varphi(\zeta, t)$ 为 t 时刻机器人运动状态函数^[17]。最终融合位置和姿态约束条件, 并输入到各个机器人设备上。

2.5 计算机人集群运动控制量

在机器人集群的运动过程中, 利用传感器设备实时检测机器人的位置和姿态角数据, 并与规划的运动路径进行比对, 得出任意机器人运动控制量的计算结果。运动控制量的计算过程可以表示为:

$$\begin{cases} \Delta x = x_i(t) - x_{i,p}(t) \\ \Delta y = y_i(t) - y_{i,p}(t) \\ \Delta \theta = \theta_i(t) - \theta_{i,\text{set}}(t) \end{cases} \quad (12)$$

式中, $(x_i(t), y_i(t))$ 和 $(x_{i,p}(t), y_{i,p}(t))$ 分别代表 t 时刻机器人 i 的实际位置和规划位置, $\theta_i(t)$ 和 $\theta_{i,\text{set}}(t)$ 表示机器人 i 姿态角的实际值和目标值。由此完成机器人集群运动控制量的计算工作。

2.6 实现机器人集群运动控制

在规划运动路径和设置条件的约束下, 将计算得出的

机器人集群运动控制量输入到控制器中, 控制器自动生成的控制指令可以表示为:

$$\begin{cases} v_{\text{linear}} = \kappa_1 \cdot d \\ v_j = \kappa_1 \cdot \vartheta_{\text{control}} + \kappa_2 \cdot \vartheta_f \end{cases} \quad (13)$$

式中, κ_1 和 κ_2 均表示控制参数, 其具体取值由控制器的工作方式决定, 变量 d 为规划运动路径的长度, $\vartheta_{\text{control}}$ 表示参考框架水平轴和连接机器人运动中心与目标位置向量之间的夹角, ϑ_f 为机器人目标位置在全局环境中的方位角^[18]。根据生成的机器人集群运动控制指令, 利用公式 (14) 计算出机器人左右驱动轮的电机转速。

$$\begin{cases} v_{\text{left}} + v_{\text{right}} = 2v_{\text{linear}} \\ v_{\text{left}} - v_{\text{right}} = 2L_{\text{wheel}}\omega_j \end{cases} \quad (14)$$

式中, 参数 L_{wheel} 为左右驱动轮的中心距离, 将式 (13) 的计算结果代入到式 (14) 中, 即可得出左右驱动轮电机转速 v_{left} 和 v_{right} 的计算结果, 并将其直接作用在机器人的驱动电机上。按照上述方式, 生成机器人集群中所有单一机器人的实时控制指令, 从而完成对机器人集群的运动控制^[19]。在实际控制过程中, 需要实时更新机器人集群的运动数据以及环境数据, 若检测发现当前机器人位置出现偏差需重新生成控制指令, 若检测发现环境中出现新的障碍物, 且障碍物与规划路径重合, 则需要利用偏微分方程生成新的运动路径。

综上可得出机器人集群运动控制系统软件流程如图 5 所示。

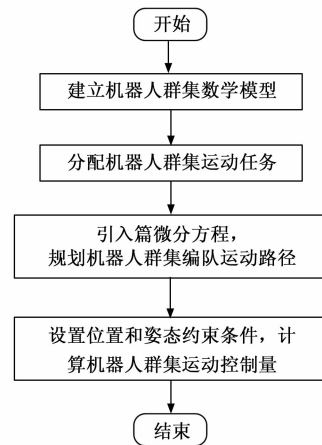


图 5 机器人集群运动控制系统软件流程图

3 系统测试

以测试基于偏微分方程约束的机器人集群运动控制系统的控制效果为目的, 选择 Webots 作为系统的开发运行平台, 设计系统测试实验。Webots 平台能够快速还原环境场景, 允许用户通过物理性质建立机器人模型, 从而实现控制指令的生成与传输。Webots 平台提供了一个传感器库, 便于在机器人样机中插入传感器并对传感器的工作参数进行调整^[20]。除此之外, Webots 平台还支持偏微分方程的运行程序, 从而保证基于偏微分方程约束在机器人集群运动

控制系统中的正常运行。为体现出优化设计系统在运动控制效果方面的优势，设置传统的基于输出反馈线性化的运动控制系统和基于领航跟随的运动控制系统作为实验的对比系统。

3.1 准备机器人集群样机

此次系统测试实验选择的机器人型号为 LS20，属于微型移动机器人，其硬件和软件均完全开放。LS20 机器人以双轮作为移动元件、差分电机作为驱动装置，机器人直径约为 8.2 cm，重量约为 180 g，机器人主要由塑胶零件构成，内置动力电池，并可拆卸，因此不会因充电而发生停机。此次实验共准备 5 台相同型号的机器人，组成机器人集群。

3.2 配置机器人集群运动环境与初始位姿

为验证优化设计机器人集群运动控制系统的有效性，布置无障碍和有障碍两种室内实验环境，其中无障碍环境保证机器人集群的运动路线上无障碍，而有障碍环境是在无障碍环境的基础上，加设多个纸盒箱作为障碍物，障碍物的设置位置随机。在配置的实验环境中，布设机器人集群，具体的布设情况如图 6 所示。



(a) 无障碍物环境 (b) 有障碍物环境

图 6 机器人集群初始位姿与运动环境示意图

从图 6 中可以看出机器人集群在初始状态下呈一字横队分布，并将所有机器人的初始工作参数设置成默认值。

3.3 生成机器人集群运动目标路径

按照一字横队的编队方案，结合实验运动环境的布设情况，生成机器人集群运动目标路径，一字横队方案下机器人路径的规划结果如图 7 所示。

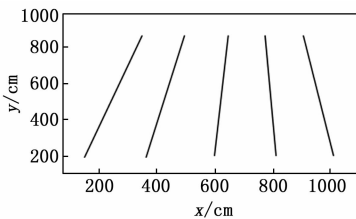


图 7 机器人集群运动目标路径规划结果

根据机器人集群运动目标路径的规划结果，生成系统的运动控制任务，并记录任意时刻各个机器人的位置坐标和姿态角，以此作为系统运动控制任务的目标值。

3.4 设置系统测试指标

此次系统测试实验分为两个部分，分别为机器人集群运动路径的跟踪控制和机器人集群的避障控制，其中机器人集群运动路径跟踪控制效果的测试指标为位置控制误差，

其数值结果如下：

$$e_{\text{position}} = \sum_{i=1}^{n_{\text{robot}}} (|x_i - x_{p,i}| + |y_i - y_{p,i}|) \quad (15)$$

式中， $x_i, y_i, x_{p,i}$ 和 $y_{p,i}$ 与式 (12) 一致， n_{robot} 为群集中包含的单一机器人数量，系统测试实验中取值为 5。计算得出位置误差值越大，证明对应系统的运动路径跟踪控制效果越差。另外机器人集群避障控制的量化测试指标为碰撞次数，其测试结果为：

$$N_{\text{collision}} = N_{r-r} + N_{r-o} \quad (16)$$

其中： N_{r-r} 和 N_{r-o} 分别表示机器人之间以及机器人与障碍物之间的碰撞次数。系统控制作用下，机器人碰撞次数越多，证明对应系统的避障控制效果越差。

3.5 系统测试过程与结果分析

将优化设计控制系统的硬件设备安装在机器人设备上，将所有硬件设备调整至运行状态，将其接入到通信网络环境中。将实验系统以及对比系统编写成程序代码，导入到主测计算机中，实现系统的开发。

3.5.1 运动跟踪控制实验

在无障碍物环境下，导入生成的机器人集群运动轨迹，执行运动控制程序，完成运动跟踪控制任务。系统执行运动跟踪控制时的运行界面如图 8 所示。



图 8 机器人集群运动控制系统运行界面

在完成一次机器人集群运动控制任务后，重置机器人运动数据，将控制系统切换至对比系统，执行相应的控制程序。统计各个机器人的实时运动数据，得出反映系统运动跟踪控制效果的测试结果，如表 1 所示。

表 1 系统运动跟踪控制效果测试数据表

单一机器人编号	机器人运动目标位置		基于输出反馈线性化的运动控制系统下的实际运动位置		基于领航跟随的运动控制系统下的实际运动位置		基于偏微分方程约束的机器人集群运动控制系统下的实际运动位置	
	x	y	x	y	x	y	x	y
R01	382	820	388	811	386	814	380	820
R02	437	820	431	812	434	812	436	820
R03	611	820	604	834	605	829	610	825
R04	773	820	765	826	766	824	772	817
R05	952	820	944	825	946	823	952	820

将表1中的数据代入到式(15)中,计算得出传统控制系统下机器人群集的运动跟踪控制误差分别为77 cm和56 cm,优化设计基于偏微分方程约束的机器人群集运动控制系统下的运动跟踪控制误差为13 cm。由此证明优化设计的运动控制系统具有更好的运动跟踪控制效果。

3.5.2 机器人群集避障控制实验

在有障碍物环境下,重复执行运动与控制工作,记录各个机器人的碰撞信息,经过式(16)的计算得出碰撞次数的测试结果,如图9所示。

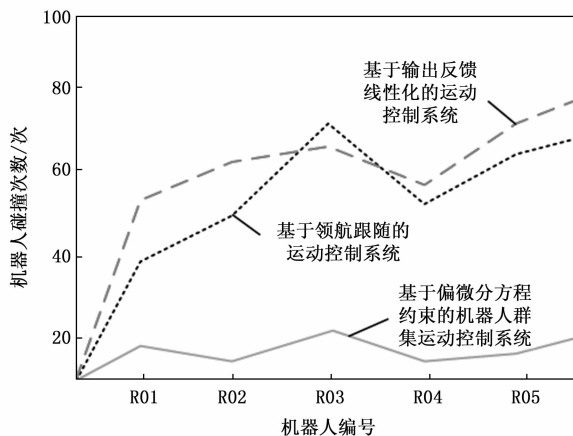


图9 机器人群集避障控制实验结果

从图9中可以直观地看出,与传统运动控制系统相比,在优化设计的机器人群集运动控制系统下机器人的碰撞次数明显降低,其中,基于输出反馈线性化的运动控制系统的平均碰撞次数为60次,基于领航跟随的运动控制系统的平均碰撞次数为53次,基于偏微分方程约束的机器人群集运动控制系统的平均碰撞次数为15次,即优化设计系统的避障控制效果更佳。

4 结束语

机器人群集是机器人工作的最新方式,能够解决单一机器人在大型工作中的局限性。在此次研究中,通过偏微分方程约束理论的支持下,生成机器人群集运动控制的精准约束条件,提高机器人群集在面对同时作业任务时的问题解决能力,从而帮助人们摆脱繁重、重复性高的劳动。从系统测试结果中可以看出,优化设计的机器人群集运动控制系统在运动跟踪和避障方面具有良好的控制效果,运动跟踪控制误差为13 cm,群集运动过程中碰撞次数平均值为15次,对于提高机器人群集的工作效率以及延长机器人的使用寿命具有积极意义。然而受到空间和时间的限制,此次系统测试实验忽略了对机器人姿态角的测试,且设置的测试数量任务数量较少,测试结果存在一定的偶然性,为此在今后的研究工作中还需要对测试数据进行补充。

参考文献:

[1] 安嘉强, 汤晓华, 刘美莲, 等. 基于 ARM-MCX514 的机器人—数控协同系统运动控制器设计 [J]. 机床与液压, 2020,

48 (3): 58-62.

- [2] 王佳佳, 马磊, 韩晓霞, 等. 基于输入输出反馈线性化的移动机器人混合编队控制 [J]. 计算机工程与设计, 2016, 37 (2): 525-529.
- [3] 彭滔, 陈延政, 刘成军. 基于领航跟随法的机器人可变队形编队控制 [J]. 控制工程, 2020, 27 (8): 1434-1439.
- [4] 陈亚, 史朝亮, 高锦宏, 等. 基于 STM32+FPGA 的六自由度机器人运动控制器设计 [J]. 机械设计与制造, 2020 (4): 240-243.
- [5] 黄春耀, 王超, 马亮静. 六旋翼机器人运动控制与跟踪控制研究 [J]. 机械设计与制造, 2020 (6): 257-260, 264.
- [6] 黄强, 李松涛, 高源, 等. 一种架空导线巡检机器人的运动控制系统 [J]. 仪表技术与传感器, 2020 (12): 86-89, 94.
- [7] 钟秋波, 陈浩文, 张文辉. 基于 D-H 参数的 M-DOF 机器人建模、规划与控制系统设计 [J]. 黑龙江大学自然科学学报, 2020, 37 (3): 367-371.
- [8] 袁俊杰, 刘海涛, 潘国庆, 等. 基于 EtherCAT 和 TwinCAT3 的协作机器人控制系统设计 [J]. 科学技术与工程, 2021, 21 (8): 3159-3168.
- [9] 黄加俊, 卿兆波, 张珠耀, 等. 基于激光 SLAM 的全方位移动机器人控制系统设计 [J]. 科技通报, 2020, 36 (7): 81-85.
- [10] 张申毅, 樊绍胜, 程嘉翊, 等. 基于 STM32 的轨道式巡检机器人控制系统的设计 [J]. 仪表技术与传感器, 2020 (9): 93-97, 116.
- [11] 李荣, 栾贻青, 王海鹏, 等. 全向四驱变电站巡检机器人运动控制系统设计 [J]. 机床与液压, 2020, 48 (8): 112-116.
- [12] 寇立伟, 项基. 基于输出反馈线性化的多移动机器人目标包围控制 [J]. 自动化学报, 2022, 48 (5): 1285-1291.
- [13] 王茂, 周少武, 张红强, 等. 未知环境下群机器人多目标搜索协同控制 [J]. 控制理论与应用, 2022, 39 (4): 750-760.
- [14] 谭瑶, 梅杰. 利用方位角信息的移动机器人编队控制 [J]. 控制理论与应用, 2021, 38 (7): 1043-1050.
- [15] 陈奕梅, 康雪晶, 徐鹏. 复杂环境下多移动机器人控制算法研究 [J]. 电光与控制, 2021, 28 (4): 48-52.
- [16] 吴军成, 肖宇峰, 霍建文. 不确定环境下多机器人编队控制研究 [J]. 计算机应用研究, 2021, 38 (4): 1123-1127.
- [17] 武星, 余文康, 楼佩煌, 等. 大型部件的多机器人合作搬运协同导引控制 [J]. 中国机械工程, 2022, 33 (13): 1586-1595.
- [18] 高继勋, 黄全振, 赵媛媛. 基于领航跟随的多机器人编队控制方法 [J]. 中国测试, 2021, 47 (11): 8-13.
- [19] 倪洪杰, 朱俊威, 俞立, 等. 切换拓扑下多舞台移动机器人编队容错跟踪控制 [J]. 高技术通讯, 2020, 30 (8): 844-852.
- [20] 黄安怡, 许剑鑫, 侯至丞, 等. 基于 RISE 的多移动机器人渐近轨迹跟踪控制 [J]. 组合机床与自动化加工技术, 2020 (9): 84-89.