

基于双环滑模控制的全向移动工业机器人 多目标点跟踪控制系统设计

周峻水

(北京奔驰汽车有限公司, 北京 100176)

摘要: 全向移动工业机器人在实际应用场景中, 经常处于存在较高噪音的环境中, 导致多目标跟踪的性能变差, 为此设计基于双环滑模控制的全向移动工业机器人多目标点跟踪控制系统; 系统硬件设计了主控制器模块及主控制器芯片; 在数据采集模块中配置数据采集卡, 实施帧数据采集; 在无线通信模块中, 采用 Wi-Fi 无线通信技术, 实现系统的远程控制、数据传输功能; 系统软件部分设计基于 GhostNet 的改进目标检测网络, 实施多目标点检测; 设计基于改进 SORT 算法的多目标点跟踪算法, 实现多目标点跟踪; 设计基于双环滑模控制的多目标点跟踪控制器, 实现多目标点跟踪控制; 测试结果表明, 静态障碍物情况下, 在仓库场景下, 设计系统的目标点跟踪准确性平均值为 97.23%, 室外场景下的目标点跟踪准确性平均值为 96.37%; 动态障碍物情况下, 两种场景下系统的目标点跟踪准确性略低于静态障碍物情况。

关键词: 双环滑模控制; 全向移动工业机器人; 多目标点跟踪; 主控制器

Design of Multi target Point Tracking Control System for Omnidirectional Mobile Industrial Robot Based on Double Loop Sliding Mode Control

ZHOU Junshui

(Beijing Benz Automotive Co., Ltd., Beijing 100176, China)

Abstract: In practical application scenarios, omnidirectional mobile industrial robots often work in high noise environments, resulting in poor performance of multi-objective tracking. Therefore, a multi-objective point tracking control system for omnidirectional mobile industrial robots based on double loop sliding mode control is designed. Design the system's main controller module and main controller chip; Configure a data acquisition card in the data acquisition module to implement the frame data acquisition; In the wireless communication module, Wi-Fi wireless communication technology is used to achieve the system's remote control and data transmission functions. The system software design adopts an improved object detection network based on GhostNet, implementing multi object point detection. the multi-objective point tracking algorithm based on the improved SORT algorithm is designed to achieve the multi-objective point tracking. The multi-objective point tracking controller based on dual loop sliding mode control is designed to achieve the multi-objective point tracking control. Experimental results show that in static obstacles, the average target tracking accuracy of the designed system in warehouse scenarios is 97.23%, and the average target tracking accuracy of outdoor scenarios is 96.37%; The system target tracking accuracy of dynamic obstacles is slightly lower than that of static obstacles.

Keywords: double loop sliding mode control; omnidirectional mobile industrial robots; multi target tracking; main controller

0 引言

全向移动工业机器人多目标点跟踪控制系统是近年来机器人技术领域研究的热点之一。随着工业自动化和智能制造的快速发展, 全向移动机器人在生产线上的应用越来越广泛。然而, 对于全向移动工业机器人多目标点跟踪控制系统的研究还处于不断发展和完善的过程中, 需要进一步探讨和研究^[1]。全向移动工业机器人是一种可以在二维平面上全方位移动的工业机器人。它具有高精度、高速度和高效率的特点, 可以应用于复杂的生产环境中。在现代化工厂和生产线中, 全向移动工业机器人的应用越来越广泛, 涉及多种领

域, 如装配、搬运、检测、包装等。通过全向移动工业机器人多目标点跟踪控制系统, 可以实现对生产过程中各个环节的精确控制和自动化执行, 从而提高生产效率, 降低了生产成本, 同时提高产品质量的稳定性^[2]。

对于全向移动工业机器人多目标点跟踪控制系统的研究, 涉及多个学科领域, 如机器人学、控制理论、计算机视觉、人工智能等。这些学科领域相互交叉和融合, 为全向移动工业机器人多目标点跟踪控制系统的发展提供了坚实的理论基础。具体来说, 全向移动工业机器人需要具备自主导航、路径规划、目标点跟踪等多方面的功能。它需

收稿日期: 2023-12-22; 修回日期: 2024-01-31。

作者简介: 周峻水(1978-), 男, 大学本科, 工程师。

引用格式: 周峻水. 基于双环滑模控制的全向移动工业机器人多目标点跟踪控制系统设计[J]. 计算机测量与控制, 2024, 32(8): 174-180.

要根据预设路径自主地追踪并避免碰撞，同时还要对生产线上的多个目标点进行精确地定位和跟踪，因此对其实施多目标点跟踪控制是很有必要的。在这个过程中，全向移动工业机器人需要具备一定的自适应能力和鲁棒性，以应对各种不确定因素和干扰。

目前，相关领域学者已经对机器人跟踪控制问题实施了大量研究。并在研究过程中，取得了一定的成果。其中，文献 [3] 提出一种基于自适应扩张状态观测器的轮式移动机器人轨迹跟踪控制算法，实现了跟踪误差的迅速收敛。并将其与传统算法对比，发现设计算法在鲁棒性和有效性上表现更好。文献 [4] 提出一种机器人的鲁棒轨迹跟踪控制系统，仿真实验结果表明，系统对于外部干扰或模型不精确对于机器人产生的影响有着良好的抑制作用。文献 [5] 提出一种全向移动机器人的自抗扰轨迹跟踪控制方法，并在不同扰动下实施了仿真测试，测试结果表明，该控制器收敛速度快、跟踪误差小，有着良好的鲁棒性与抗干扰性。这些研究成果为工业机器人跟踪控制系统的进一步发展提供了有益的参考和启示。

然而以上方法在噪声较高的室外环境无法取得较为准确的目标跟踪效果，同时无法实现多目标点跟踪控制。现针对全向移动工业机器人设计一种多目标点跟踪控制系统。

1 全向移动工业机器人多目标点跟踪控制系统设计

1.1 硬件设计

1.1.1 主控制器模块设计

在主控制器模块中，设计一种全向移动工业机器人多目标点跟踪控制的主控制器芯片，该芯片由处理器子模块、存储器子模块、传感器接口子模块、电源管理子模块构成。

在处理器子模块中，设计一种具有高效能、低功耗、易于编程等特点的嵌入式微处理器，将其作为主处理器，负责处理各种数据采集、运动控制、路径规划等任务^[6]。通过该处理器的强大功能，可以大大提高全向移动工业机器人多目标点跟踪控制中的性能和响应速度。

基于当前最先进的工艺制程技术设计该嵌入式微处理器，采用混合信号处理器的架构，其结构具体如图 1 所示。

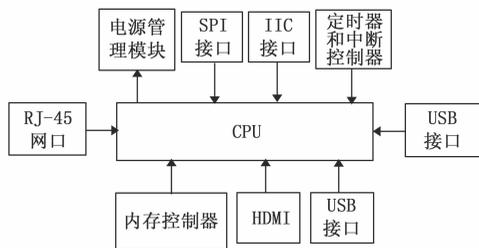


图 1 嵌入式微处理器结构设计

CPU 是整个微处理器的核心，主要负责数据计算、逻辑判断和指令执行等任务。该微处理器采用哈佛结构，内核为 32 位 RISC 处理器，与 MIPS32 指令集架构兼容。该

处理器实现了 87 条指令，包括浮点运算，大部分指令能够在 1 个时钟周期内完成^[7]。CPU 的整体结构划分情况如图 2 所示。

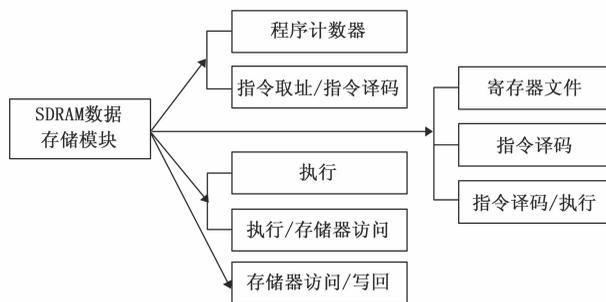


图 2 CPU 的整体结构划分情况

该 MIPS 内核的 RTL 级设计文件包括以下 8 个具体作用的模块：程序计数器（PC）模块负责生成下一条指令的地址和传送当前指令；指令取址/指令译码（IF/ID）模块使用变址寄存器在取指令和译码阶段传递指令地址和信息^[8]；ID 模块通过指令译码器解码指令，并提供目标寄存器地址、源操作数和运算类型；寄存器文件（Regfile）模块作为 CPU 的通用寄存器组，包含 4 个通用寄存器；指令译码/执行（ID/EX）模块使用变址寄存器在译码和执行阶段传递译码结果；EX 模块包含运算器，根据运算类型执行指定的运算；执行/存储器访问（EX/MEM）模块使用变址寄存器在访存和执行阶段传递执行结果；存储器访问/写回（MEM/WB）模块中设置一个变址寄存器，主要工作于回写阶段与访存阶段，负责向回写阶段传递访存阶段的结果。

内存控制器主要负责管理 CPU 对内存的访问。为了提高微处理器内存访问速度和减少功耗，设计一种高速缓存（Cache）和低功耗内存（LP-DDR）相结合的内存控制器，其构成如图 3 所示^[9]。

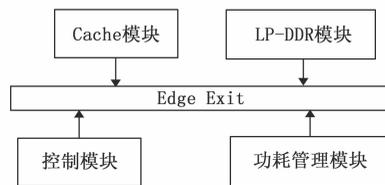


图 3 内存控制器构成

控制模块是整个内存控制器的核心，采用 AT-TINY406-MFR 芯片，它负责接收来自 CPU 和其他设备的内存访问请求，并调度和分配访问高速缓存和 LP-DDR 的顺序。控制模块还负责管理缓存的一致性，确保 CPU 可以正确地访问到最新的数据。

Cache 模块是高速缓存的组成部分，它由多个缓存行组成，每个缓存行可以存储一个数据块。Cache 模块负责在 CPU 发出内存访问请求时，快速查找是否有目标数据块已经存储在缓存行中^[10]。如果存在，则直接从缓存中读取数据并返回给 CPU；如果不存在，则向 LP-DDR 发送数据请

求,并在数据返回后将数据块存储到缓存行中。

LP-DDR 模块是低功耗内存的组成部分,它由多个 Bank 组成,每个 Bank 可以存储大量的数据。LP-DDR 模块负责在 Cache 模块无法找到目标数据块时,向 CPU 返回“未找到”信号,并同时向 LP-DDR 发送数据请求。LP-DDR 在接收到请求后,会从其 Bank 中读取数据块并将其发送到 Cache 模块中。

数据总线用于连接控制模块、Cache 模块和 LP-DDR 模块之间的数据传输。从 CPU 发出的数据请求通过控制模块和 Cache 模块发送到 LP-DDR 模块中,从 LP-DDR 返回的数据通过 Cache 模块和控制模块发送到 CPU 中。选用的数据总线为 DP 总线^[11]。

功耗管理模块主要通过功耗管理器监控系统的功耗情况,并根据需要动态调整 Cache 模块和 LP-DDR 模块的工作模式以降低功耗。例如,当系统处于空闲状态时,可以关闭 Cache 模块或 LP-DDR 模块的某些部分以节省电能。

这种由高速缓存 (Cache) 和低功耗内存 (LP-DDR) 相结合的内存控制器可以在保证高速数据传输的同时降低系统的功耗。

I/O 接口主要用于连接外部设备和内部处理器。选用可配置的 I/O 接口,使微处理器可以方便地与各种传感器和执行器进行连接,具体如表 1 所示。

表 1 配置的 I/O 接口

序号	接口名称	接口类型
1	HDMI	视频接口
2	USB 接口	数据传输接口
3	RJ-45 网口	集成网卡接口

定时器和中断控制器是嵌入式微处理器的重要模块,用于实现定时操作和中断处理。设计一种高性能的定时器和中断控制器,以满足各种实时性要求。

为实现微处理器的精确控制和同步,设计高精度时钟电路作为定时器。该电路可以产生高频时钟信号,并通过分频和倍频等技术,实现微处理器的定时。该电路主要由以下几个部分组成:晶体振荡器、频率合成器、定时器。其中晶体振荡器是时钟电路的核心,它可以产生高频时钟信号,精度很高。采用的晶体振荡器为石英晶体振荡器。频率合成器用于产生多种不同频率的时钟信号,以满足微处理器的工作需要^[12]。主要利用分频和倍频等技术,将晶体振荡器的输出信号转换成所需的时钟信号。定时器是时钟电路的重要部分,可以产生定时脉冲信号,用于微处理器的定时和控制,由计数器、比较器和译码器组成。

选用的中断控制器为 ARM 中断控制器。为了方便与外部设备进行通信,为该嵌入式微处理器设计了 SPI 和 IIC 接口。这两种接口协议具有简单和高速的特点,可以满足不同的通信需求。

存储器子模块由 Flash 存储器和 SRAM 存储器构成。其中 Flash 存储器用于存储程序和数据,具有非易失性;

SRAM 存储器用于实时数据存储和缓存,具有高速读写特点。

在传感器接口子模块中,设置串行接口和并行接口将传感器连接到主控制器芯片上。传感器接口模块负责传感器数据的采集和预处理,能够大大提高数据精度和可靠性。

电源管理子模块负责为微处理器提供稳定的电压和电流。通过电压转换芯片实现各部件的供电,使用的电压转换芯片为 LM331N/NOPB。

1.1.2 数据采集模块设计

在数据采集模块中,选用的传感器是摄像头。摄像头可以捕捉到丰富的视觉信息,这些信息可以用于目标检测等任务。设计一种高清摄像头传感器,由感光元件、镜头、固定结构、控制电路组成。感光元件是摄像头传感器的核心部分,负责将通过镜头进的光线转换为电子信号。选用的感光元件为 CCD,CCD 的色彩还原能力强,灵敏度高。镜头是摄像头的另一关键部分,负责聚焦光线,形成图像。镜头的选型主要考虑其焦距、光圈和视角。在研究中,选用的镜头为广角镜头。摄像头传感器需要一个稳定的固定结构以防止图像抖动^[13]。设计一个由镜头座、镜头筒、滤色片和固定环组成的固定结构。为其设置 USB 接口、HDMI 接口,使其能够与其他设备连接。

设计一种数据采集卡,由模数转换器、数字信号处理器等构成。模数转换器是数据采集卡的核心元件之一,其主要功能是将模拟信号转换为数字信号。选用的 ADC 芯片为 ADC0832。DSP 用于对数据进行预处理,通过使用 DSP,可以减少数据的冗余,并优化数据的处理流程。选用的 DSP 芯片为 TMS320F2812PGFA。

数据采集卡需要具备与外部设备进行通信的接口。设计的通信接口如表 2 所示。

表 2 通信接口设计

序号	接口名称	序号	接口名称
1	USB 接口	3	SPI 接口
1	PCI 接口	4	I2C 接口

数据采集卡需要具备一定的容量的内存以存储采集到的实时数据。同时,为了支持脱机操作或扩展功能,可能需要额外的存储设备,配置 SD 卡与 CF 卡作为内存存储设备与额外存储设备。

1.1.3 无线通信模块设计

在无线通信模块中,采用 Wi-Fi 无线通信技术,实现系统的远程控制、数据传输功能。选择基于 Wi-Fi 的无线通信芯片 ESP8266。该芯片具有高性能和低功耗的特点,能够实现高速数据传输和远程控制。为了确保无线通信模块的稳定运行,需要设计合理的电源管理方案,首先选择合适的电源芯片,接着制定电源电路的设计方案,如图 4 所示。

天线是无线通信模块的关键部分之一,它负责将信号发送到空中和从空中接收信号^[14]。根据通信频段和应用场景,选择的天线为 LoRaWAN 天线。

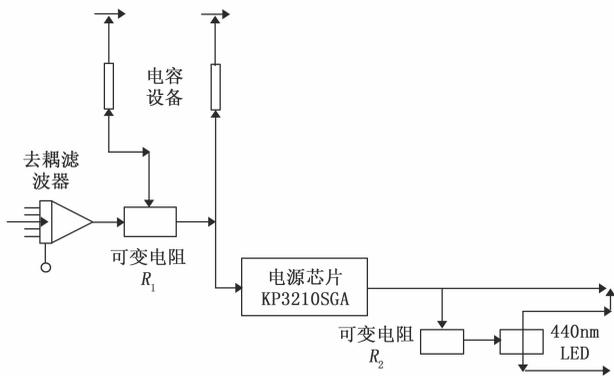


图 4 电源电路的设计方案

1.2 软件设计

1.2.1 基于改进 GhostNet 网络的机器人多目标点检测

在多目标点检测中,设计一种基于 GhostNet 的改进目标检测网络,实施全向移动工业机器人多目标点检测。

在 GhostNet 网络中,首先找到一些原始的特征图,然后通过线性变换生成 Ghost 特征图,以较小的代价实现该步骤。整个 GhostNet 是由 Ghost 模块堆叠而成的,是一个轻量级网络,相对于 MobileNet V3,其准确度更高,模型计算参数和计算量更小^[15]。Ghost 模块与深度可分离卷积模块一样,有效地降低了普通卷积所产生的大量计算量。但在 MobileNet 仍有大量的 1×1 卷积,这些卷积仍占用大量计算量与内存,采用以下的转换方法,具体步骤如下:

1) 应用普通卷积生成共 n 个原始特征图。其中原始特征图如下式:

$$y' = x * w' \quad (1)$$

式中, y' 为原始特征图, x 为输入, w' 为卷积核。

2) 为获取所需的特征图,对 y' 内各原始特征实施线性运算,以生成 z 个幻影特征图,具体如下式:

$$Y_{ij} = \zeta_j(y'), i = 1, \dots, n, j = 1, \dots, z \quad (2)$$

式中, ζ_j 为第 j 个线性运算, Y_{ij} 为第 j 个幻影特征图。

通过以上操作即可获得 m 个特征图,具体如下式:

$$B = Y_{ij}[b_1, b_2, \dots, b_m] \quad (3)$$

式中, b_m 为第 m 个特征图^[16]。

将其作为 Ghost 模块的输出。整个 Ghost 模块具体如下:输入特征图首先实施一次普通卷积。将线性变换与恒等映射的输出关联起来并作为最后的输出。简单来说,整个 Ghost 模块的核心运算可以分为常规卷积、Ghost 生成以及特征图拼接这三步。

改进后的 GhostNet 网络还沿用了 ResNet 内的残差结构。这种残差结构允许网络学习更复杂的函数,同时减轻了神经网络中的梯度消失问题。

1.2.2 基于改进 SORT 算法的机器人多目标点跟踪

基于改进 GhostNet 网络检测机器人的多目标点, GhostNet 通过结合轻量级的 Ghost 块和残差结构,既保持了网络的深度,又降低了模型的复杂性和计算成本。这种

改进的网络结构可以提高模型的性能,同时减少模型的大小和计算资源需求,更适合在资源受限的设备上运行。在多目标点跟踪中,设计一种基于改进 SORT 算法的多目标点跟踪算法,实现全向移动工业机器人多目标点跟踪。

在 SORT 算法中,通过匈牙利算法将检测器检出的目标框与卡尔曼滤波利用当前帧目标位置预测的目标框实施 IOU 匹配,以建立前后帧间的目标关联,实现目标追踪。该算法在追踪目标时,仅利用检测出的目标特征实施前后目标匹配,未涉及目标的表观特征。当目标遭受遮挡后再次出现时,便需更换目标标签。为改进这一情况,提出一种新的算法,加入目标的外观颜色特征,有效保存目标的整体特征,降低标签切换的问题^[17]。

在改进算法中,将两帧图像视为离散情况,通过巴氏系数表示表观关联系数,具体如下式:

$$R_i(a, b) = \frac{B}{F_{(a, b)}} \quad (4)$$

式中, $F_{(a, b)}$ 为巴氏系数,其计算公式具体如下:

$$F_{(a, b)} = \sqrt{1 - E_{(a, b)}} \quad (5)$$

式中, $E_{(a, b)}$ 是指连续情况下的对应巴氏系数。

利用匈牙利算法的颜色直方图系数结果与 IOU 计算结果实施关联矩阵的构造:

$$R_{ij} = \delta R_{IOU}(a, b) + \chi R_i(a, b) \quad (6)$$

式中, $R_{IOU}(a, b)$ 为检测目标与预测目标的 IOU 值, $R_i(a, b)$ 为颜色直方图系数结果, δ, χ 为权重系数。

利用上式的关联矩阵即可在匈牙利算法中加入目标的颜色特征。在实施多目标跟踪时,即可通过颜色特征降低目标遮挡以后标签切换情况的发生概率。

在 SORT 算法中,为了对目标实施跟踪,需要将轨迹特征与目标进行匹配。为此,将目标轨迹分为 3 种状态:已匹配的轨迹、未匹配的轨迹和未匹配的检测框。利用匈牙利算法不断更新这 3 种状态的轨迹,并为每个目标分配标签。然而,这种数据关联算法在目标遮挡后重新出现以及目标过多重叠的情况下,难以实现实时跟踪,并且可能导致目标标签频繁切换的问题。为了解决这些问题,提出了一种改进的数据关联算法。

该算法将轨迹分为两种状态:确定轨迹、不确定轨迹。每种状态的轨迹都有一个存活时间。在研究中,将存活时间直接设置如下式:

$$g = 100 \text{ frames} \quad (7)$$

当该时间到达 g 时,完全丢弃轨迹,视为目标完全消失。

对于第一帧检测器检测到的目标经过卡尔曼滤波预测出来的轨迹都被划分为不确定轨迹,存活时间更新为 1。然后将不确定的轨迹与第二帧检测器检测到的目标实施关联匹配。对于未匹配成功的轨迹,说明目标在下一帧中消失,因此仍被划分为不确定轨迹,并且其存活时间加 1。对于匹配上的轨迹,由于目标可能存在重叠的情况,因此下一帧中目标可能丢失。一旦目标成功匹配一次,就将存活时间

清零, 转为确定轨迹。这样可以使算法及时捕捉到目标并生成轨迹^[18]。

对于未匹配上的检测框, 为其生成新的不确定轨迹, 存活时间同样更新为 1。在实施第三帧的数据关联过程中, 首先与确定的轨迹进行匹配。这是因为匹配上的轨迹成功率更高, 如果没有匹配成功, 将其划分为不确定轨迹, 存活时间更新为 1。然后将剩下的不确定轨迹的存活时间加 1, 参与到下一次的关联匹配中去。

1.2.3 基于双环滑模控制的机器人多目标点跟踪控制

利用改进 SORT 算法实现机器人多目标点跟踪, 通过将所有轨迹划分为两种状态, 并且为每种状态设置存活时间, 能够提高算法的性能, 并且在目标遮挡拥挤的情况下保持轨迹不丢失, 有效减少目标标签切换的问题。设计一种基于双环滑模控制的多目标点跟踪控制器, 作为主控制器芯片的软件算法, 实现全向移动工业机器人多目标点跟踪控制。

双环滑模控制器的设计理论依据主要基于滑模控制理论。滑模控制是一种特殊的控制策略, 其基本思想是系统动态行为按照预定的模式在滑模面上滑动, 从而实现对系统的控制。在设计双环滑模控制器时, 首先需要确定滑模面的状态方程。滑模面被设计为两个环路, 即内环和外环。内环滑模面负责机器人的多目标点轨迹跟踪控制, 外环滑模面则用于误差纠正。通过合理设计这两个滑模面的状态方程, 可以实现对于机器人运动的精确控制。

该多目标点跟踪控制器由内环和外环两个滑模面组成, 分别负责机器人的多目标点轨迹跟踪控制和误差纠正。

首先确定全向移动工业机器人的动力学模型。通常采用牛顿第二定律来描述其运动, 即:

$$G = R_y(u * c) \quad (8)$$

其中: G 为作用在全向移动工业机器人上的力, u 为机器人的质量, c 为其加速度。

接着设计内环滑模面。内环滑模面负责全向移动工业机器人的轨迹跟踪控制。

定义全向移动工业机器人某目标的期望轨迹为 ϵ , 实际轨迹为 φ 。通过定义滑模面 S_1 , 将 φ 与 ϵ 的误差 φ_1 (即 $\varphi - \epsilon$) 和误差的变化率 γ_1 都控制在极小的范围内^[19]。

滑模面 S_1 的表达式具体如下:

$$S_1 = \varphi_1 + \gamma_1 \quad (9)$$

选择切换函数 σ_1 为 S_1 的正弦函数, 以保证系统在不同状态间的平滑切换, 具体如下式所示:

$$\sigma_1 = \sin\left(\frac{S_1}{2}\right) \quad (10)$$

然后设计外环滑模面, 外环滑模面负责机器人的跟踪误差纠正。定义全向移动工业机器人的轨迹跟踪误差为 φ_2 。通过定义滑模面 S_2 , 将 φ_2 和误差的变化率 γ_2 都控制在极小的范围内。

滑模面 S_2 的表达式具体如下:

$$S_2 = \varphi_2 + \gamma_2 \quad (11)$$

选择切换函数 σ_2 为 S_2 的正弦函数, 以保证系统在不同状态间的平滑切换, 具体如下式所示:

$$\sigma_2 = \sin\left(\frac{S_2}{2}\right) \quad (12)$$

在双环滑模控制器设计中, 滑模趋近律是用于确定系统从当前状态到达滑模面的速度和方式的。选择适当的趋近律对于控制器的性能和稳定性至关重要。这些趋近律根据系统的特性和控制要求进行选择和调整。在双环滑模控制器中, 分别设计内环和外环的趋近律。对于内环滑模面, 我设计指数趋近律, 以保证系统快速且平滑地跟踪期望轨迹。而对于外环滑模面, 选择幂次趋近律, 以更好地纠正跟踪误差。根据滑模控制理论, 构建趋近律如下:

$$G = u * c = \sigma_1 G_1 + \sigma_2 G_2 \quad (13)$$

其中: G_1 和 G_2 分别为内环和外环的控制器输出, 由下式计算:

$$G_1 = \left(\frac{\varphi_1}{dt}\right) * \cos\left(\frac{S_1}{2}\right) \quad (14)$$

$$G_2 = \left(\frac{\varphi_2}{dt}\right) * \cos\left(\frac{S_2}{2}\right) \quad (15)$$

其中: G_1 和 G_2 这两个输出各自对控制效果具有如下影响: 首先, G_1 作为内环控制器的输出, 对机器人的轨迹跟踪性能产生主要影响。当 G_1 增加时, 机器人的加速度也会相应增大, 从而使得机器人能够更快地跟踪期望的轨迹; 其次, G_2 是外环控制器的输出。 G_2 主要影响机器人的跟踪误差纠正能力^[20]。在存在轨迹跟踪误差的情况下, G_2 会促使机器人调整自身的轨迹以减小误差。当 G_2 增大时, 机器人的调整力度也会相应增大, 从而更快地减小误差。

在双环滑模控制器设计中, 证明系统在滑模控制下的稳定性。通过分析系统的动态方程和滑模面的性质来实现。使用 Lyapunov 方法来分析系统的稳定性。Lyapunov 函数用于描述系统状态的能量变化, 在控制过程中逐渐减小, 那么系统是稳定的。通过选择适当的 Lyapunov 函数, 可以分析双环滑模控制器的稳定性和性能。

通过双环滑模控制方法实现全向移动工业机器人多目标点跟踪控制器的设计。在实际应用中, 可以根据实际需求调整切换函数 σ_1 和 σ_2 的参数以及控制器的增益来优化控制效果。

2 实验测试

2.1 搭建实验平台

实验中选用的全向移动工业机器人为 Mecanum 四轮移动机器人, 利用设计的全向移动工业机器人多目标点跟踪控制系统对其实施多目标点跟踪控制, 测试设计系统的多目标点跟踪控制性能。

首先搭建实验机器人的多目标点跟踪控制测试平台。平台硬件部分由一台笔记本电脑、运动控制板及云台组成。

采用笔记本电脑作为上位机搭建系统的软件, 实施视频帧的处理。其配置为 Window10 操作系统、32 G 内存、i8 处理器。为了确保摄像头传感器采集的数据准确可靠, 实

验前需要对摄像头传感器实施校准。

在运动控制板上完成主控制器芯片与基于双环滑模控制的多目标点跟踪控制器的移植，实现跟踪控制指令的输出。

选择二自由度云台，作为实施多目标点跟踪控制的机械基础，连接运动控制板与云台，具体如图 5 所示。



图 5 连接运动控制板与云台

平台软件部分包括 Keil5 环境、OpenCv 视觉库。

2.2 实验过程

实验平台搭建完成后，需要将跟踪控制程序下载到运动控制板的处理器中，然后实施多运动目标随动跟踪实验，具体步骤为：

1) 准备阶段：给云台上电、打开摄像头、手动调整云台把多个待跟踪目标调整到视场中。

2) 检测阶段：上位机根据系统软件算法对目标实施检测，把目标图像偏差通过串口发送到运动控制板，控制云台旋转使目标处于视场中心。

其中某场景的目标检测效果如图 6 所示。



图 6 某场景的目标检测效果

3) 跟踪控制阶段：目标开始运动，上位机根据系统软件算法结合运动控制板实施多目标位置坐标的实时跟踪控制。

4) 结束跟踪：为了测试实验系统在各种环境下的多目标跟踪控制性能，需要采用以下应用场景：仓库、室外。为了测试设计系统的跟踪控制性能，设置不同类型的障碍物，包括静态障碍物、动态障碍物。

2.3 实验结果分析

测试设计系统在静态障碍物下的目标点跟踪准确性，即跟踪器在一段时间内对目标位置的估计值与实际值之间

的误差。在测试中，将文献 [3] 提出的基于自适应扩张状态观测器的轮式移动机器人轨迹跟踪控制算法、文献 [4] 提出的机器人的鲁棒轨迹跟踪控制系统与文献 [5] 提出的全向移动机器人的自抗扰轨迹跟踪控制方法作为对比测试方法，并分别用对比方法 1、对比方法 2、对比方法 3 来表示。

在分别设置 5 个静态障碍物后，在仓库与室外两种场景下，设计系统与对比方法 1、对比方法 2、对比方法 3 的目标点跟踪准确性测试结果如表 3 所示。

表 3 目标点跟踪准确性测试结果

场景	目标序号	目标点跟踪准确性/%			
		设计系统	对比方法 1	对比方法 2	对比方法 3
仓库	1	96.7	85.4	83.4	80.1
	2	96.9	86.3	82.9	79.5
	3	96.3	86.7	83.6	79.9
	4	97.8	85.1	83.8	80.4
	5	97.5	87.2	82.7	80.9
	6	98.2	86.3	83.1	81.2
室外	1	95.5	83.2	82.1	79.2
	2	96.1	84.5	82.3	79.8
	3	96.8	84.9	81.5	79.5
	4	95.9	83.8	81.7	80.4
	5	96.7	84.1	81.9	80.6
	6	97.2	84.6	82.5	80.1

根据表 3 测试结果，静态障碍物情况下，在仓库场景下，设计系统的目标点跟踪准确性平均值为 97.23%，高于对比方法 1、对比方法 2、对比方法 3 的目标点跟踪准确性，说明设计系统在仓库场景下的目标点跟踪准确性更高，同时设计系统是同步实现多目标跟踪的，而其目标点跟踪准确性测试结果更高，更表明设计系统拥有优秀的目标点跟踪性能。在室外场景下，设计系统的目标点跟踪准确性平均值为 96.37%，设计系统的目标点跟踪准确性同样高于对比方法 1、对比方法 2、对比方法 3。同时在室外场景下由于影响因素更多，因此目标点跟踪准确性相比仓库场景低。

在分别设置 5 个动态障碍物后，在仓库与室外两种场景下，设计系统与对比方法 1、对比方法 2、对比方法 3 的目标点跟踪准确性测试结果如图 7 所示。

根据图 7 结果可以看出，动态障碍物情况下由于难度提升，几种测试方法的目标点跟踪准确性测试结果都有所下降，仍然是室外场景下目标点跟踪准确性相比仓库场景更高。其中设计系统在仓库场景与室外场景下，设计系统的目标点跟踪准确性均低于对比方法 1、对比方法 2、对比方法 3。上述结果表明，所设计系统在静态障碍物及动态障碍物的设置下，均能实现全向移动工业机器人多目标点的准确跟踪。

3 结束语

工业机器人多目标点跟踪控制系统在现代化工厂和生产线中具有广泛的应用前景。通过精确控制机器人的运动轨迹，可以确保生产过程中各个环节的精确执行。设计了

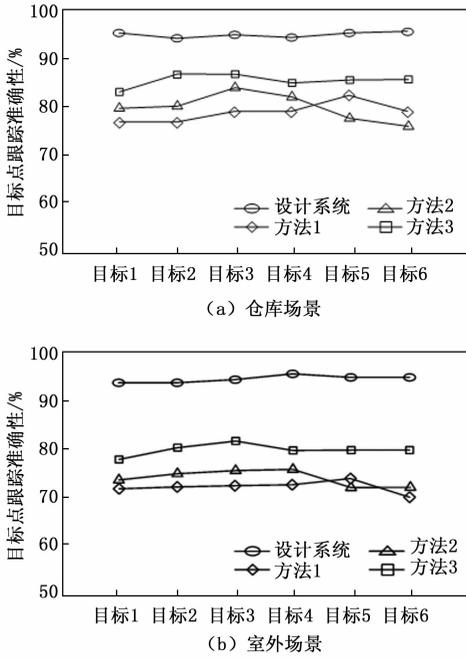


图 7 目标点跟踪准确性测试结果

一种基于双环滑模控制的全向移动工业机器人多目标点跟踪控制系统, 实验结果表明, 该系统在多目标点跟踪任务中表现出良好的性能, 能够有效地跟踪多个目标点, 实现了多种障碍物与场景下的准确多目标点跟踪。本设计的完成可为全向移动工业机器人的智能化、自主化提供重要支持, 并为多目标跟踪控制系统的研究提供新的思路和方法。

参考文献:

[1] 董方方, 金 栋, 赵晓敏, 等. 基于 Udawia-Kalaba 方法的全向移动机器人轨迹跟踪控制 [J]. 合肥工业大学学报 (自然科学版), 2022, 45 (1): 7-12.

[2] 陈 华, 王梦琪, 陈 云. 时滞的非完整动力学系统滑模抗干扰跟踪控制 [J]. 控制理论与应用, 2023, 40 (7): 1181-1189.

[3] 张小俊, 刘昊学. 轮式移动机器人轨迹跟踪控制研究 [J]. 计算机工程与科学, 2022, 44 (10): 1804-1811.

[4] 田 露, 柴 晶. 机器人的鲁棒轨迹跟踪控制系统 [J]. 河南教育学院学报: 自然科学版, 2010, 19 (2): 33-35.

[19] 陈 猛, 郑一鸣, 陈非凡. 电阻式传感器智能感知节点误差校准方法研究 [J]. 仪表技术与传感器, 2022, 475 (8): 94-99.

[20] 袁立山, 解伟男, 奚伯齐, 等. 一种半球谐振子固有刚性轴方位的标定方法 [J]. 中国惯性技术学报, 2021, 29 (4): 526-531.

[21] 高文斌, 褚亚杰, 余晓流. 一种基于工具坐标系的机器人运动学参数标定方法 [J]. 中国机械工程, 2022, 33 (18): 2183-2189.

[5] 张相胜, 黄 将. 全向移动机器人的自抗扰轨迹跟踪控制 [J]. 机械科学与技术, 2022, 41 (12): 1869-1876.

[6] 陈浩华, 赵 红, 王 宁, 等. 复杂扰动下水下机器人的轨迹精确跟踪控制 [J]. 中国舰船研究, 2022, 17 (2): 98-108.

[7] 占红武, 厉 晟, 胥 芳. 非完整移动机器人路径跟踪的快速非线性模型预测控制方法 [J]. 高技术通讯, 2021, 31 (4): 405-416.

[8] 张相胜, 黄 将. 全向移动机器人的自抗扰轨迹跟踪控制 [J]. 机械科学与技术, 2022, 41 (12): 1869-1876.

[9] 郭文东, 魏 莹, 李振阳, 等. 基于模糊干扰观测器的移动机器人自适应滑模跟踪控制 [J]. 科学技术与工程, 2021, 21 (36): 15529-15536.

[10] 林显新. 基于 PID 控制的全向移动机器人运动连接系统仿真研究 [J]. 食品与机械, 2021, 37 (3): 102-104.

[11] 颜佳晴, 鲁聪达, 蔡颖杰, 等. 基于积分模型预测控制的全向移动机器人轨迹跟踪研究 [J]. 高技术通讯, 2021, 31 (10): 1081-1089.

[12] 郑雪芳, 林 意. 基于布谷鸟算法的工业机器人轨迹跟踪控制 [J]. 机床与液压, 2021, 49 (5): 50-54.

[13] 张 卉, 朱永飞, 刘雪飞, 等. 基于模糊迭代 Q-学习的冶金工业机器人轨迹跟踪控制研究 [J]. 工程设计学报, 2022, 29 (5): 564-571.

[14] 苏 建, 李在娟. 融合视觉和以太网技术的工业机器人分拣装配控制系统设计 [J]. 机床与液压, 2021, 49 (24): 119-123.

[15] 师五喜, 姜万蕾, 李宝全. 输入受限轮式移动机器人轨迹跟踪控制 [J]. 天津工业大学学报, 2022, 41 (5): 73-78.

[16] 郜冬林, 裴以建, 朱久德, 等. 轮式移动机器人预定时间轨迹跟踪控制 [J]. 云南大学学报: 自然科学版, 2021, 43 (1): 33-38.

[17] 王 宁, 王 宁, 鲁 挺, 等. 水下机器人-机械手系统末端执行器固定时间轨迹跟踪控制 [J]. 大连海事大学学报, 2021, 47 (2): 11-19.

[18] 章 龙, 周 颖. 质心不重合的移动机器人自适应滑模轨迹跟踪控制 [J]. 微电子学与计算机, 2023, 40 (2): 15-21.

[19] 沙 莎, 王辉平. 轮式移动机器人滑移轨迹跟踪控制策略研究 [J]. 机床与液压, 2023, 51 (9): 62-69.

[20] 曾令城, 李明富, 杨真真, 等. 基于先验速度修正的工业机器人曲面跟踪柔顺控制 [J]. 机械工程学报, 2022, 58 (1): 41-51.

[22] 齐 尧, 朱彦齐, 李永乐, 等. 面向动静混合环境的智能车运动规划方法 [J]. 交通运输系统工程与信息, 2022, 22 (4): 293-301.

[23] 何金成, 李华俊, 王海兵. 基于 300MVA 脉冲发电机组双闭环矢量控制建模及仿真 [J]. 核聚变与等离子体物理, 2021, 41 (4): 603-609.

[24] 庙要要, 王 楠, 王建华, 等. 基于 Petri 网的多无人平台协同指挥控制建模与分析 [J]. 战术导弹技术, 2022, 216 (6): 103-110.