

# 无方向约束的工业机器人障碍物自主规避控制方法

何 猛, 王 建

(中国矿业大学, 江苏 徐州 221116)

**摘要:** 为了提升工业机器人在复杂动态环境中的灵活性与适应性, 减少因障碍物导致的生产中断, 提出一种无方向约束的工业机器人障碍物自主规避控制方法。构建工业机器人动态作业区, 在该区域内利用超声波技术自主感知作业环境中的障碍物, 获取机器人与障碍物的距离以及二者相对角度信息。依据模糊控制理论建立工业机器人障碍物自主规避控制模型, 将经过上位机校验和滤波处理后的机器人与障碍物的距离、相对角度作为输入量, 输入至模糊控制模块。在该模块中, 经过模糊化、推理及清晰化操作, 输出机器人避障控制信号, 明确机器人速度调整范围和转向角范围。最后, 将避障控制信号传递至机器人电机驱动器, 以此调整机器人运动状态, 实现无方向约束的障碍物自主规避控制。实验结果表明, 所提方法可以有效实现无方向约束的工业机器人障碍物自主规避控制, 在面对复杂的作业环境时, 依然能够保持稳定的避障性能, 且具有较强的环境适应性。

**关键词:** 工业机器人; 自主避障; 无方向约束; 超声波技术; 路径规划; 规避控制

中图分类号: TN911-34; TP242

文献标识码: A

Method of autonomous obstacle avoidance control for industrial robot without direction constraint

HE Meng, WANG Jian

(China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

**Abstract:** In order to enhance the flexibility and adaptability of industrial robots in complex dynamic environments, reduce production interruptions caused by obstacles, a method of autonomous obstacle avoidance control for industrial robots without directional constraints is proposed. The dynamic working area of industrial robots is constructed, in which the ultrasonic technology is used to independently perceive obstacles in the working environment and obtain the distance and relative angle information between the robots and obstacles. The automatic obstacle avoidance control model of industrial robot is established according to the fuzzy control theory. The distance and relative angle between the robot and the obstacle after verification and filtering by the upper computer are used as the input and are input into the fuzzy control module. In this module, the robot obstacle avoidance control signal is output after fuzzy, reasoning and clear operation, so as to define the robot speed adjustment range and steering angle range. The obstacle avoidance control signal is transmitted to the motor driver of the robot to adjust the motion state of the robot and realize the autonomous obstacle avoidance control without direction constraints. The experimental results show that the proposed method can effectively realize the autonomous obstacle avoidance control of industrial robots without directional constraints, and can still maintain stable obstacle avoidance performance in the face of complex working environments, showing strong environmental adaptability.

**Keywords:** industrial robot; autonomous obstacle avoidance; no direction constraint; ultrasonic technology; path planning; avoidance control

## 1 引言

为自动化生产线的核心设备, 工业机器人周围通常会存在各种障碍物<sup>[1-2]</sup>。一旦工业机器人在作业过程中未能及时避开这些障碍物, 就会出现碰撞问题, 不仅会损坏机器人自身和周围的设备, 导致生产中断, 增加维修成本和停机时

间, 还可能危及现场工作人员的安全。因此, 为了保障生产过程的安全稳定, 对工业机器人进行避障控制十分必要<sup>[3-5]</sup>。

关于机器人避障问题, 诸多学者开展看相关研究, 如陈艺文等人<sup>[6]</sup>将机器人的运动状态和环境信息集成到一个动态窗口内, 模拟机器人运动轨迹, 并根据轨迹的平滑性、安全性等评价函数从中选择最优轨迹, 从而确保机器人在考虑动力学约束的同时, 能够安全地避开障碍物并尽可能快地到

达目标点。但该方法高度依赖于评价函数的参数设置,一旦设置不合理,则会导致避障失败。蔡志浩等人<sup>[7]</sup>通过动态视觉传感器实时捕捉环境中的事件信息,并采用滤波算法去除背景噪声,再通过光流法识别环境中障碍物的位置与运动状态,继而规划出能够避开动态障碍物的最优路径。但光照突然变化会导致光流估计不准确,影响对障碍物的检测和定位效果。黄志清等人<sup>[8]</sup>通过双分辨率栅格地图存储障碍物和高程信息,以节省空间并保留地形细节,再引入A\*算法代价函数,综合评估引导机器人选择最优路径,有效避开非平坦地形中的障碍。但对于未知环境或地图信息不完整的情况,该方法难以进行有效的避障规划。陈佳等人<sup>[9]</sup>通过建立引力场和斥力场实现避障。通过动态调整引斥力强度、引入速度矢量约束和位置预测,优化轨迹平滑性,避免局部极小值和振荡,实现高效避碰。虽然该方法引入速度矢量约束优化轨迹平滑性,但在紧急避障时,这种约束会成为应对突发障碍的制约。

无方向约束是指一种不受固定方向或路径限制的运动与决策模式<sup>[10]</sup>。对于工业机器人,无方向约束指的是机器人在执行任务时,不依赖于预先设定的固定方向或路径,而是能够根据实时环境感知,动态调整自身的运动方向和姿态,以适应复杂多变的工作环境<sup>[11]</sup>。为此,本文研究无方向约束的工业机器人障碍物自主规避控制方法,旨在使机器人能够灵活调整运动轨迹。

## 2 工业机器人障碍物自主规避控制

### 2.1 构建工业机器人动态作业区

为提高避障效率,根据工业机器人的工作范围和任务需求,构建其作业动态区域,以确保对作业区域的有效覆盖和实时监控,为后续的障碍物感知和避障决策提供空间基础。

该区域宽度  $h_k$  和长度  $h_c$  的公式描述为:

$$h_k = l_z + 2l_s \quad (1)$$

$$h_c = \lambda h_k \quad (2)$$

式中:  $l_z$  为机器人作业宽度;  $l_s$  为安全余量;  $\lambda$  为经验系数。

每间隔一段时间对该区域进行一次更新,实时捕捉作业区域内的动态变化情况,确保避障策略与当前环境状态保持高度同步。

### 2.2 基于超声波技术的障碍物自主感知

超声波作为高频声波,其具有着穿透力强、方向性好等特点<sup>[12]</sup>,将其应用于工业机器人作业环境障碍物感知中,可以有效检测并定位障碍物,为机器人的避障决策提供可靠

依据。

在机器人动态作业区域内,采用一发多收的方式展开对障碍物的感知。为超声波传感器配备1个发射器和2个接收器。通过测定超声波信号从发射器发出,到被各接收器接收反射回波的时间间隔,由此可推算出障碍物与各接收器间的距离,再通过三角定位原理,即可确定障碍物的准确位置。

基于超声波的障碍物感知定位示意图如图1所示。

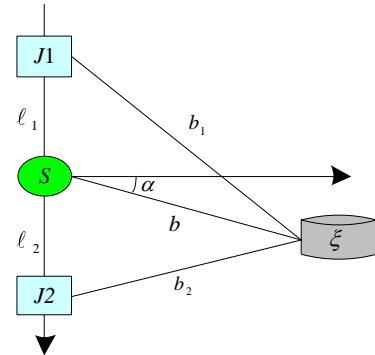


图1 基于超声波的障碍物感知定位示意图

图1中,  $S$  为发射器,  $J1$  和  $J2$  分别为分居其两侧的接收器,  $\xi$  为障碍物,  $\ell_1$  和  $\ell_2$  分别为  $S$  与  $J1$  和  $J2$  的距离,  $b$  为  $S$  与  $\xi$  间的距离,  $b_1$  和  $b_2$  分别为  $J1$ 、 $J2$  与  $\xi$  间的距离。若  $S$  从开始发射超声波至  $\xi$ , 并反射至  $S$  处所用时间是  $t$ , 反射至  $J1$  和  $J2$  所用时间是  $t_1$  和  $t_2$ , 声波传播速度是  $v$ , 那么  $b$ 、 $b_1$  和  $b_2$  可以通过下式获取:

$$b = (t \times v) / 2 \quad (3)$$

$$b_1 = t_1 \times v - b \quad (4)$$

$$b_2 = t_2 \times v - b \quad (5)$$

由此,可得出  $\xi$  相对于  $S$  的角度  $\alpha$  的方程式,描述为:

$$\cos(\frac{\pi}{2} - \alpha) = -\sin \alpha = (b^2 + \ell_2^2 - b_2^2) / (2b\ell_2) \quad (6)$$

结合获取的  $b$  和  $\alpha$  信息,便可以确定障碍物的具体位置,进而实现对机器人动态作业区域内障碍物的自主感知。

### 2.3 工业机器人障碍物自主规避控制的实现

为了实现无方向约束的工业机器人障碍物自主规避控制,即在不依赖人工预设的固定方向的情况下,机器人能够自主感知环境并实时调整运动轨迹以避开障碍物。本文依据

模糊理论, 对这一问题进行处理。模糊理论具备较强的适应性和灵活性<sup>[13]</sup>, 其允许对机器人的运动控制规则进行模糊化处理, 不局限于特定的方向设定。通过将传感器获取的障碍物信息转化为模糊语言变量并进行推理决策, 能够让机器人在动态环境中自主判断并实时调整运动轨迹。基于模糊理论的工业机器人障碍物自主规避控制模型如图 2 所示。

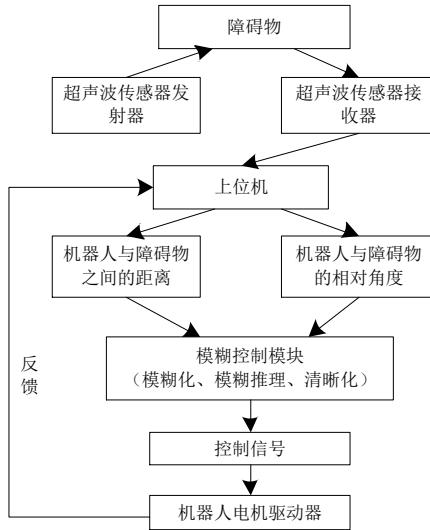


图 2 基于模糊理论的工业机器人障碍物自主规避控制模型

当工业机器人利用超声波技术感知到动态作业区有障碍物时, 将获取的机器人与障碍物的距离  $b$  以及二者的相对角度信息  $\alpha$  输送到上位机后, 进行校验和滤波处理。将处理后的信息作为输入量输入至模糊控制模块。在该模块中, 经过一系列模糊操作, 得到机器人避障控制信号。随后, 将信号传入机器人的电机驱动器中用于调整机器人的运动状态, 从而实现自主规避控制。具体过程描述如下:

1) 利用 2.2 小节方法对工业机器人动态作业区的障碍物进行自主感知, 获取机器人与障碍物的距离  $b$  与角度信息  $\alpha$ , 并传送至上位机处。

2) 上位机接收到  $b$  和  $\alpha$  后, 其对展开校验和滤波处理, 确保数据准确性和可靠性, 再将经过处理后的数据  $b'$  和  $\alpha'$  传递模糊控制模块中。

3) 模糊控制模块负责对上位机传送过来的  $b'$  和  $\alpha'$  进行模糊操作, 以实现机器人避障行为的智能决策。具体来说, 模糊控制模块由三个单元组成, 即模糊化单元、模糊推理单元以及清晰化单元。其中:

a) 模糊化单元: 将机器人与障碍物精确的距离和角度信息  $b'$  和  $\alpha'$  转换为模糊变量, 为模糊推理提供基础, 同时也可以提高决策的灵活性和适应性。首先定义机器人与障碍物距离和角度的模糊集合, 分别为 {极近, 较近, 较远}

和 {左转, 直行, 右转}, 然后利用隶属度函数, 计算  $b'$  和  $\alpha'$  分别属于各个模糊集合的隶属度。这一过程可通过三

角形隶属度函数来实现。

关于  $b'$  的隶属度公式为:

$$\rho(b') = \begin{cases} 1, & b' \leq \tilde{b}_1, b' \geq \tilde{b}_3 \\ \frac{\tilde{b}_2 - b'}{\tilde{b}_2 - \tilde{b}_1}, & \tilde{b}_1 < b' < \tilde{b}_2, \tilde{b}_2 < b' < \tilde{b}_3 \\ 0, & b' \geq \tilde{b}_2 \end{cases} \quad (7)$$

式中: “极近”和“较近”模糊集合间的边界值用  $\tilde{b}_1$  描述; “较

近”模糊集合的顶点用  $\tilde{b}_2$  描述; “较近”和“较远”模糊集合间

的边界值用  $\tilde{b}_3$  描述。根据式 (7) :

“极近”: 如果  $b' \leq \tilde{b}_1$ , 则隶属度为 1; 如果

$\tilde{b}_1 < b' < \tilde{b}_2$  则隶属度随  $b'$  增大而线性减小至 0。

“较近”: 如果  $\tilde{b}_1 < b' < \tilde{b}_2$  或  $\tilde{b}_2 < b' < \tilde{b}_3$ , 则隶属度

在相应区间内线性变化。

“较远”: 如果  $b' \geq \tilde{b}_3$ , 则隶属度为 1。

角信息  $\alpha'$  的隶属度采用与  $b'$  隶属度相同的方式进行求取。

b) 模糊推理单元: 根据模糊规则库, 对模糊化后的距离和角度信息进行推理, 得出机器人应该采取的避障行为。

机器人自主避障规则见表 1。

表 1 工业机器人自主避障规则

编号	前提条件	结论
r1	前方障碍物极近	停止直行
r2	前方障碍物较近, 右方无障碍, 左方有障碍	中速右转
r3	前方障碍物较近, 左方无障碍, 右方有障碍	中速左转
r4	前方障碍物较近, 左右均无障碍	中速转向宽敞一侧
r5	前方障碍物较近, 左右均有障碍	停止直行
r6	前方障碍物较远, 右方无障碍且左方有障碍	低速右转
r7	前方障碍物较远, 左方无障碍且右方有障碍	低速左转
r8	前方障碍物较远, 左右均无障碍	高速转向宽敞一侧
r9	前方障碍物较远, 左右均有障碍	停止直行
r10	前方无障碍物	均速直行

对于每条避障规则，根据其前提条件的实际输入计算对应的隶属度函数值，并相乘得到激励强度  $\vartheta$ ，激励强度越高，表示规则在当前情况下的适用程度越高，即机器人越有可能采取该规则对应的避障行为。 $\vartheta$  描述为：

$$\vartheta = \rho_1(x_1) \times \rho_2(x_2) \times \cdots \times \rho_m(x_m) \quad (8)$$

式中：前提条件用  $x$  描述；其数量用  $m$  描述。

依据  $\vartheta$  确定模糊控制模块输出的关于机器人速度调整范围和转向角度范围模糊集合的隶属度。

模糊推理单元根据所有满足前提条件的规则的激励强度，以及规则对应的结论，通过 Mamdani 模糊推理算法得出模糊的输出变量，即机器人应该调整的速度范围和转向角度范围的模糊值。

c) 清晰化单元：利用最大隶属度法将模糊推理的模糊输出转换为具体的控制信号，即输出关于机器人速度调整范围和转向角度范围的指令，此信号将用于控制机器人的运动状态。通过输出速度调整范围和转向角度范围，机器人可以在这些范围内灵活调整其运动状态，无需受限于固定参数或方向，从而实现无方向约束的自主避障。

4) 发出自主避障控制指令。将解模糊化后的速度调整范围和转向角度范围信号作为控制指令发送给机器人的电机驱动器。同时，机器人将当前的运动状态（实际速度、转向角度）实时反馈给上位机，上位机根据这些反馈信息以及预设的避障策略，调整模糊控制器的输入参数及规则库，进而可以实现循环控制操作。通过这一闭环控制机制，机器人能够不断适应环境变化，动态调整运动状态，从而实现工业机器人的无方向约束避障自主控制。

### 3 实验分析

以应用于某智能化汽车制造生产线上的工业机器人作为实验对象，该机器人属于移动机器人，负责自主配送零部件和成品，以提升生产线的自动化水平。

该移动机器人的相关信息如下：处理器型号为 RK3288；最大负载能力为 200 kg；移动速度为 0~1.2 m/s；额定驱动电机功率为 300 W；定位精度为  $\pm 5$  mm；电池续航为 8 h（连续工作）；通信方式为 WiFi、5G、以太网；工作环境温度为 -10 °C 至 50 °C。

针对本次实验设置的主要参数如下：超声波传感器型号为 MDCN-UB500-18GM75-U-V15；上位机型号为 ADVANTECH-IPC-610；动态作业区更新时间为 2s；经验系数为 1.2；安全余量为 0.8 m。

为了分析本文方法的应用效果，实验首先构建该机器人的动态作业区域。然后将超声波传感的发射器安装在机器人的正前面，两个接收器分居其两侧，以此获取作业区域内的障碍物信息。之后，构建基于模糊理论的工业机器人障碍物

自主规避控制模型，利用该模型实现工业机器人的无方向约束避障自主控制。工业机器人自主避障效果图见图 3。

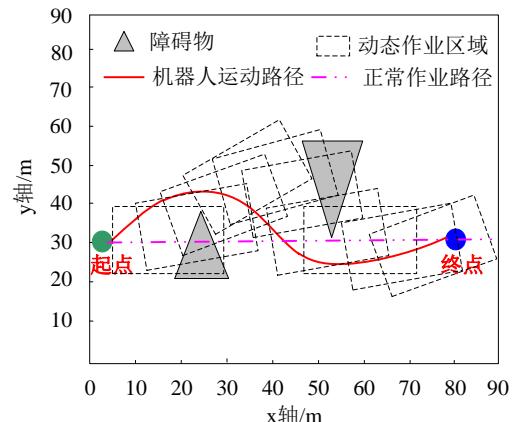


图 3 工业机器人自主避障效果图

图 3 可知，应用本文方法机器人能够准确识别并规避障碍物，同时保持稳定的运动轨迹，展现出了出色的避障能力和自主决策能力。这一结果充分验证了本文方法的有效性和实用性，为工业机器人的自主作业提供了有力的技术支持。

实验利用灵敏系数对本文所提障碍物感知方法进行了测试，得出的结果见图 4。

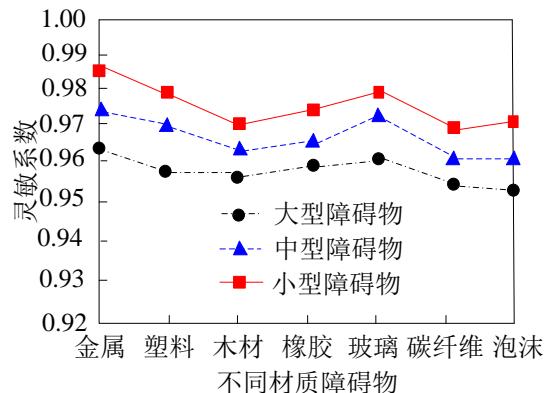


图 4 障碍物感知灵敏度分析

由图 4 可知，灵敏系数曲线在不同测试条件下均保持较为稳定的高水平状态，波动较小，灵敏系数均在 0.95 以上。由此说明，本文所提障碍物感知方法在面对不同材质和大小障碍物时，具有较高的灵敏性和可靠性。

为了进一步考量本文方法的性能，实验增加了作业环境的复杂度，在其中添加了多个障碍物，以模拟更为真实且具挑战性的工业场景。由此得到测试结果，见图 5。由图 5 可知，在面对密集且分布不规则的障碍物时，经过本文方法控制的机器人能够灵活调整自身路径，准确识别并规避每一个潜在的风险点，确保自身安全通过。与理想路径相比，只有较小的差异，由此说明，本文方法在面对复杂作业环境时，具有高度的适应性和有效性，能够确保机器人在复杂环境中

实现高效、安全的自主避障。

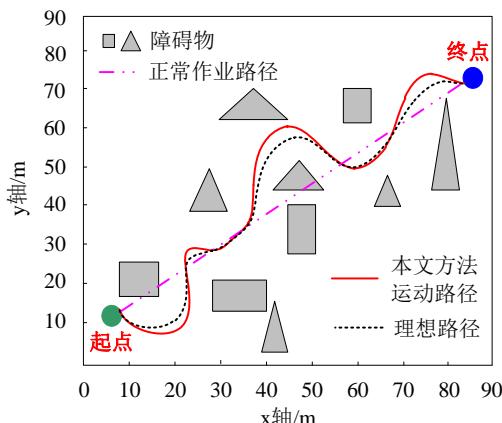


图 5 复杂作业环境下的避障情况

## 4 结 论

本文提出了一种无方向约束的工业机器人障碍物自主规避控制方法,该方法使机器人在无预先设定方向的情况下,自主感知环境并规避障碍物。实验表明,该方法显著提高了机器人在复杂环境中的避障能力,降低了碰撞风险。未来,随着传感器技术、人工智能算法的进步,本文方法将得到进一步的优化,将会实现更高精度的环境建模与避障能力,为智能工业领域提供更安全、高效、灵活的机器人解决方案。

## 参考文献

- [1] 李林峻,李坤全,王旭辉,等.工业机器人六自由度装配序列规划下避障研究[J].机械设计与制造,2024(1):353-358.
- [2] 乔贵方,蒋欣怡,高春晖,等.基于多目标优化的工业机器人位置与姿态精度提升方法[J].仪器仪表学报,2023,
- [3] 褚晶,周力,岳頲,等.一种基于 Petri 网的多机器人路径规划建模方法[J].西北工业大学学报,2024,42(4):716-725.
- [4] 杨晓宇,于海生,李哲.多关节工业机器人 BSMC 与 EPCH 协同优化控制[J].组合机床与自动化加工技术,2023(11):112-115.
- [5] 张泽坤,国凯,孙杰.基于扰动观测器的工业机器人高精度闭环鲁棒控制[J].机械工程学报,2022,58(14):62-70.
- [6] 陈艺文,江文松,杨力,等.基于运动约束的移动机器人路径规划[J].计算机集成制造系统,2023,29(4):1186-1193.
- [7] 蔡志浩,陈文军,赵江,等.基于动态视觉传感器的无人机目标检测与避障[J].北京航空航天大学学报,2024,50(1):144-153.
- [8] 黄志清,李鼎鑫,王庆文.非平坦地形下移动机器人安全路径规划[J].控制与决策,2022,37(2):323-330.
- [9] 陈佳,张珂,杜英森,等.基于改进势场法的多无人机避碰控制方法[J].探测与控制学报,2024,46(4):93-100.
- [10] 张泮虹,倪涛,赵亚辉,等.基于最优控制策略的复杂环境移动机器人轨迹规划[J].农业机械学报,2022,53(7):414-421.
- [11] 刘东升,王俊生.非结构化环境中基于拓扑约束的地面无人驾驶路径规划算法[J].控制与决策,2022,37(12):3103-3114.
- [12] 刘帅,王帆,李丙林.非完整约束下机器人运动轨迹跟踪控制仿真[J].计算机仿真,2023,40(10):422-425.
- [13] 张磊,鲁凯,高春侠,等.基于变增益自抗扰技术的机器人轨迹跟踪控制方法[J].电子学报,2022,50(1):89-97.

作者简介:何猛(1992—),男,安徽宿州人,硕士研究生,助理实验师,研究方向为机器人控制、计算机应用。

王建(1988—),男,山东泰安人,硕士研究生,实验师,研究方向为图像处理、机器人控制。