DOI: 10.3901/JME.2019.17.077

焊接机器人避障策略研究*

王学武 汤彬 顾幸生

(华东理工大学化工过程先进控制和优化技术教育部重点实验室 上海 200237)

摘要: 焊接机器人因其高效性在工业生产中得到广泛应用,而碰撞检测关乎机器人安全生产。针对焊接机器人与工件避障的问题,利用栅格法化简环境信息的优势进行建模,利用蚁群算法运算速度快的特点寻求每两个焊点之间的避障路径,从而能够迅速地找到机器人末端和工件之间的无碰撞路径。在机器人与工装夹具避障部分,通过对机器人几何建模、焊点位置选取和姿态正逆解,利用粗略检测和精细检测结合的方法,碰撞检测完成机器人关节与工装夹具之间的避障。最后在考虑到焊枪姿态和工装夹具的条件下,根据姿态相同和焊接时间相近两个原则,利用分组竞争粒子群算法优化机器人焊接时间,实现双焊接机器人焊点划分和路径规划问题,从而实现两个机器人焊接时间最优的目标。

关键词: 避障; 路径规划; 粒子群算法; 栅格法

中图分类号: TG409

Research on Obstacle Avoidance Strategy for Welding Robot

WANG Xuewu TANG Bin GU Xingsheng

(Key Laboratory of Advanced Control and Optimization for Chemical Processes of Ministry of Education,
East China University of Science and Technology, Shanghai 200237)

Abstract: Welding robots are widely used in industrial production because of their high efficiency, and collision detection is related to the safe production of robots. Aiming at the problem of obstacle avoidance between welding robot and workpiece, this paper uses the advantage of grid method to simplify the environment information, and uses the ant colony algorithm to calculate the speed of the obstacle avoidance path between each two solder joints. Find the collision-free path between the end of the robot and the workpiece. In the obstacle avoidance part of robot and fixture, this research uses the combination of rough detection and fine detection by the geometric modeling of the robot, the selection of the welding point position and the forward and reverse solution of the attitude. The collision detection completes the obstacle avoidance between the robot joint and the fixture. Finally, considering the welding gun attitude and fixture, according to the two principles of the same attitude and welding time, the group competitive particle swarm optimization algorithm is used to optimize the welding time of the robot, and the welding point division and path planning of the double welding robot are realized. The robot has the best welding time target.

Key words: obstacle avoidance; path planning; particle swarm algorithm; grid method

0 前言

近年来,工业生产过程中虽然使用机器人完成复杂的焊接任务,但是焊接路径的制定大多依赖于工作人员的经验完成,这种方法耗时较长,路径很难达到理想状态。因此,有效的焊接机器人的路径规划对提高工业生产效率有极大帮助。文献[1]针对机器人避障,实现了机器人基于概率论的避障最优路径规划。近年来,随着对双焊接机器人系统研究的广泛和深入,越来越多的方法被运用在双焊接机

器人路径规划中。文献[2]提出了使用A*算法进行时间最优的避障路径规划用于提高自动检测机器人的运行效率。文献[3]结合视觉技术,进行了机器人平滑抓取移动物体的运动规划。双机器人路径规划问题可以通过数学方法简单的抽象为多旅行商问题,GORENSTEIN^[4]最早提出将多旅行商问题(Multi-traveling salesman problem, MTSP)转化为旅行商问题(Travelling salesman problem, TSP)的方法。文献[5]首先得到主机器人的路径,然后利用镜像原理,得到从机协调路径。文献[6]基于自适应模拟退火遗传算法对刀触点连接顺序和方式进行优化运算,获得最优刀具路径。文献[7]根据两个机器人分别和各个焊点之间的欧氏距离是否小于阈值,将焊点分别

* 国家自然科学基金资助项目(61773165, 61573144)。20180925 收到初稿, 20190306 收到修改稿

划分给两个机器人。由于焊点已经划分为两部分,因此可将这两部分焊点视为两个独立的 TSP 问题,完成焊点序列的优化。该方法为双机器人焊点划分提供了新思路。经上述文献分析可得,完成双机器人路径规划需要解决算法优化及焊点划分两个问题。而机器人与工件以及工装夹具的碰撞检测作为焊接机器人安全工作的保障需要首先考虑。

1 焊接机器人避障策略

本文采用 ABB R2400 机器人, GTW10 作为焊钳,工件为一部分白车车身。工件及焊点序号如图 1 所示。

图 1 工件图

相较于单焊接机器人系统,双机器人系统在保证机器人和工件以及工装夹具之间的避障外,需要额外考虑机器人之间的避障。工业生产过程中,常见的双机器人避障方法为延时法,即一个机器人开始工作的时间晚于另一个机器人,这种方法较为耗时耗能。为了提高焊接效率,避免碰撞发生,本文采用焊点分区、智能优化算法和碰撞检测实现有效避障。

为了保障生产效率,避免机器人发生机械损伤,首先需要对机器人和工件、工装夹具完成碰撞检测。在机器人与工件碰撞检测阶段运用蚁群算法,求得每两个焊点之间机器人末端与工件的无碰撞路径,并通过几何法计算避免碰撞发生的过渡点。然后,通过机器人建模、碰撞检测实现机器人与工装夹具避障。确定机器人与工件、工装夹具无碰撞后,运用改进过的粒子群算法优化两个机器人的焊接序列,得到时间最优的路径。

双机器人路径规划中涉及两个机器人焊点分配的问题,因此并不能简单的抽象为单旅行商问题。由于存在两个机器人协调配合,所以需要对焊点进行划分,最终简化为 MTSP 问题。本节采用改进的粒子群算法对双机器人进行路径规划时首先进行两

个机器人的焊点分配。双焊接机器人路径优化流程图如图 2 所示。

图 2 焊接机器人路径优化流程

2 焊接机器人与工件避障

焊接机器人与工件避障可划分为三个步骤:环境建模、路径搜索、避障^[8]。环境建模就是根据机器人工作空间和工件情况,利用数学方法建立环境模型。环境模型中,工件和机器人均按照实际生产中的位置摆放。路径搜索是已经得到环境建模,在此基础上找到一条满足优化要求的路径。避障是指通过碰撞检测和几何法,找到一条满足优化要求的,无碰撞的路径。

机器人避障的方法可分为传统法和智能优化方法两类,其中传统方法包括:人工势场、栅格法等。人工势场法^[9]是一种虚拟力法,主要内容为:吸引到目标和排除障碍。人工势场法结构简单,能够完成机器人各个关节和工件之间的避障。但是人工势场法的收敛精度不高,不能求得全局最优解。为解决这个问题,已经研究出通过定义新的势场方程,删除势场中的局部最优值,保障算法的收敛精度^[10]。栅格法^[11]是将机器人的工作空间利用简单的几何图形,如三角形,划分为多个简单的区域,称为栅格。这些栅格又可以根据是否包含障碍物分为障碍栅格和自由栅格。现阶段的大部分路径规划研究中,栅格法一般用于环境建模,需要结合其他智能算法,以便能快速的经过自由栅格,避开障碍栅格,找出最优的避障路径。

在路径规划碰撞检测中,本文采用栅格法和蚁群算法完成机器人末端和工件的局部避障。首先通过栅格法对工件建模,确定障碍栅格和自由栅格。然后,在每两个焊点之间利用蚁群算法找出每两个

焊点之间的无碰撞最短路径。该方法结合了栅格法简化环境信息的优势和蚁群算法运算速度快的特点, 从而能够迅速地找到机器人末端和工件之间的无碰撞路径。

2.1 三维栅格法建模

由于本文中有特定的工件, 并且双机器人工作空间较大, 因此在完成机器人路径规划之前, 首先要对机器人工作环境和工件进行建模。栅格法具有简单直观, 易于完成局部路径规划的特点, 因此本文选择栅格法完成工件建模。

(1) 用三角形描述工件。为了便于完成双机器人路径规划, 需要将工件用简单的几何图形表示出来。由于三角形更容易划分自由栅格、障碍栅格, 因此本文用若干个三角形连接在一起表示工件。

(2) 建立栅格矩阵。栅格的大小对机器人路径规划的精确程度有重要影响。如果栅格划分细密, 则得到的机器人路径较为精确, 但是路径搜索时间较长。如果栅格划分稀疏, 则路径搜索效率提高, 但是路径不准确。为了平衡路径搜索效率和搜索精度, 本文利用若干 5 mm 的立方体覆盖工件模型, 并假设每个立方体的中心都是起始点, 从这些起始点开始搜索路径。为了划分自由栅格、障碍栅格, 需要将每个立方体的中心点向三角形工件平面做投影, 若在三角形的内部没有投影点存在, 则表示该点在这个三角形上不存在障碍, 反之, 若在三角形的内部有投影点存在, 且垂线段长度小于 6 mm, 则表示该点在这个三角形上存在障碍。

(3) 划分自由栅格和障碍栅格。如果在立方体中心有障碍, 那么该点是障碍点, 反之该点是自由点。障碍点用*表示, 如图 3 所示。

图3 三维栅格法环境模型

2.2 路径搜索

在局部路径规划中, 将机器人末端视为一个点, 机器人与工件局部的避障路径就是寻求只通过自由栅格的最短路径。本文运用蚁群算法搜索通过自由栅格的最短路径, 每两个焊点之间的避障方法如下。

(1) 初始化蚁群算法的参数: 路径权重 $\alpha=1$, 启发性信息素 $\beta=11$, 权重迭代次数 $N=50$, 蚂蚁

种群数量 $M=50$, 初始化信息素矩阵 τ , 将信息素设定为 0.5。

(2) 进入第一层循环, 初始化迭代器 $n=1$ 。

(3) 进入第二层循环, 初始化迭代器 $m=1$ 。

(4) 进入第三层循环, 清空禁忌表。在这一层循环中, 每个蚂蚁独自进行最优路径搜索。

(5) 计算每个蚂蚁选择下一个前进方向的概率。在栅格法建立自由栅格和障碍栅格时选用了正方体覆盖工件, 正方体有 6 个面, 每只蚂蚁从正方体中心出发, 可以选择任意一面作为下一步前进方向。但是当相邻的正方体为障碍栅格时, 该方向将不能选择。由此可知, 蚂蚁最多有 6 种选择。为了保证方向选择的随机性, 增加搜索路径的多样性, 本文采用轮盘赌的方式选择蚂蚁前进的方向。

(6) 如果蚂蚁搜索完成从起始点到终止点的路径, 或者没有可以选择的前一步前进的方向时, 停止第三层循环, 否则跳到步骤(5)。

(7) 如果蚂蚁到达终点, 则计算路径长度 L 。若 m 小于 M , 则 $m=m+1$, 跳到步骤(4), 否则第二层循环结束。

(8) 如果 n 小于 N , 则 $n=n+1$, 跳到步骤(4), 否则第一层循环停止。

(9) 对比所有路径长度, 选择路径长度最短的路径。

根据上所述步骤可以得到蚁群在通过各个焊点的避障路径。因为蚁群是通过自由栅格, 绕开所有障碍栅格寻求到的无碰撞路径, 所以这条路径不是一条直线。所以, 为了实现焊接路径最短这一目标, 本文将得到的路径进行二次优化, 通过二次优化得到无碰最短路径。为了验证蚁群算法局部避障路径搜索的有效性, 本文选取焊点 12 和焊点 15 完成局部避障路径搜索, 并对搜索得到的路径进行二次优化, 结果如图 4 所示。

图4 局部二次优化路径

2.3 过渡点选取

如果碰撞检测后发现机器人和工件在焊接某个点时发生了碰撞, 则需要避开碰撞, 完成后续焊点

的焊接。本文中采用几何法避障^[12]，通过几何推理求出避障的中间点。

工件模型是由若干三角形组合而成，在几何法避障中，每个三角形面都当作独立的平面，因此，各个三角形之间存在两种空间关系：相邻和不相邻。若起点和终点在相邻平面，焊接起始点在平面 1，焊接终止点在平面 2，要求从焊接起点出发，经过两平面交线上一中间点到达焊接终点的路径长度最短。过渡点求解方法如图 5 所示，连接起始点为线段 1，两平面交线为线段 2，这两条线段所在直线异面。现求线段 2 上一点过渡点，使得起始点经过过渡点到达终止点的路径之和最短。这个过渡点即为这两条线段的中垂线与线段 2 的交点。

图 5 相邻平面过渡点求解图

文献[12]中，若起点和终点在不相邻的两个平面内，则选取工件外的中间点。通过人工选择一条过渡带，并对过渡带进行离散化，最终通过迭代求出路径最短的过渡点。这种方法因为需要人工选取过渡带，所以选择不够准确，不能满足距离最短的要求。针对这点不足，本文采用圆弧法解决不相邻

两个平面选取过渡点的问题。工件外的过渡点的选取以 X 型焊枪宽度 L (根据机器人型号，焊枪宽度 L 取值为 400 mm) 为安全裕度。首先连接两个不相邻平面的焊点，其次在圆柱体的安全角度范围内选定一条边缘线，并将其离散。然后，计算边缘线上每个点到两个焊点的距离并求和。最后，通过对比距离之和的值，选取距离最短的点作为不相邻平面的空间过渡点，如图 6 所示。

图 6 不相邻平面过渡点求解图

3 焊接机器人与工装夹具避障

大多数的焊接机器人路径规划是将机器人末端视为一个点，仅仅完成机器人末端和工件之间的避障。实际焊接过程中，工件是放置在工装夹具上的。因此，机器人和工装夹具的避障也必不可少。

3.1 机器人模型简化

为了便于计算和直接观察，通常在计算机器人和工件的碰撞距离之前，需要将机器人用一些简单的几何体建模^[13]。比较常见的简化方法有：胶囊体法^[12]、长方体法^[14]、球体法^[15]。这三种方法的对比如表 1 所示。

表 1 机器人模型简化方法对比

方法名	描述	优点	缺点
长方体法	长方体	精度好	对于复杂曲面逼近难度大，计算量大
胶囊体法	中间圆柱体，两侧半球的胶囊体	建模简单，能较好表示机器人关节，计算量适中	机器人关节在笛卡儿坐标系下位姿表示复杂
球体法	多个球体	数学等式简单，不需要考虑方向变化只考虑位置关系就可以，只有点-点距离计算，计算量最小	建模不够精确，计算量大

通过上述表格对比不难看出，胶囊体法具有建模简单，计算量适中的特点，因此本文采用胶囊体法对机器人进行关节层面的建模。考虑到焊钳的形状和大小，用胶囊体表示焊钳将导致建模不准确，因此焊钳使用球体建模。这种方法不仅使得机器人模型更加简单，而且减少了计算量。针对本文中实际采用的工件，最终本文使用胶囊体和球体对六个关节建模，如图 7 所示。由于第一关节至第五关节均有连杆及转动关节组成，因此第一关节至第五关节用胶囊体表示。点焊中，第六关节是焊钳，因此第六关节用球体表示。

图 7 机器人建模

3.2 分级碰撞检测

在实际生产过程中，机器人的轨迹由所有关节共同组成，除了机器人末端外，机器人的其他关节也可能与工件或工装夹具发生碰撞。因此，需要通

过几何法碰撞检测确定机器人的各个关节是否与工装夹具发生碰撞。本文针对白车车身的一部分使用双机器人焊接，两个焊接机器人对称放置于工件两侧，如图 8 所示。焊接路径已知，根据焊接路径可以看出，两个机器人之间不会发生碰撞，机械臂与工件也无碰撞。因此，则本节碰撞检测着重于机器人与工装夹具之间的碰撞检测。碰撞检测大致可以分为三部分：粗略检测，精细检测及已碰撞后路径选择。

图 8 机器人与工件摆放位置

3.2.1 粗略检测

粗略检测常用的方法之一是包围体法^[15]。通过利用若干个比原物体稍大的球体或长方体等计算简单的几何体包围原物体，运用裁剪快速剔除不容易和机器人发生碰撞的部分。该方法具有较为广泛的适用性，但是球体和长方体包围部分较大，计算较为复杂。粗略检测另一种常用方法是空间划分法^[16]，本文也采用这种方法完成粗略检测。空间划分法是将工作空间分为若干区域，在碰撞检测时只需确认每个区域的边缘是否与机器人发生碰撞。空间划分法具有表示简明，计算简单的优点，但是该方法的适用范围较小。考虑到工件模型是由若干三角形组成的几何图形，若采用包围盒法划分工件区域，只能将工件区域大致分为两部分，导致区域划分过于粗略，不能较为准确地判断出那个平面与机器人之间的距离最近。因此，本文采用空间层次划分法对工件划分，进行粗略检测，工件区域划分情况如图 9 所示，其中不同的灰度代表空间划分法中的不同区域。

图 9 工件区域划分

针对该工件，本文采用两个机器人进行焊接，位置位于工件两侧，对称放置。以右侧的机器人 1

为例，通过粗略检测，最可能发生碰撞的区域如图 10 所示。

图 10 易发生碰撞区域

3.2.2 精细检测

通过对包围盒法、人工势场法以及几何法进行对比，综合考虑到工件和焊接过程的实际情况，本文最终采用几何法进行精细碰撞检测。

几何法精细检测就是利用简化后的机器人模型，计算机器人各个关节到可能发生碰撞区域的边缘线的距离。因为机器人在焊接时分别摆放在工件的两侧，所以在精细检测部分，本文计算的是机器人简化模型到工件边缘线的距离。可分为两种情况：球心到工件边缘线的最短距离 d 和圆柱的轴心线到工件边缘线的最短距离 d 。

当包围机器人的形状为球或半球时， d 就是球心到边缘线的距离，如图 11 所示。线段两个端点的坐标为： $M_0(x_0, y_0, z_0)$ ， $M_1(x_1, y_1, z_1)$ 圆心坐标为： $o(x, y, z)$ 。当几何体为圆柱时，最短距离 d 就是轴心线到边缘线的距离，如图 12 所示，各点坐标为： $M_{m0}(x_{m0}, y_{m0}, z_{m0})$ ， $M_{m1}(x_{m1}, y_{m1}, z_{m1})$ ， $N_{n0}(x_{n0}, y_{n0}, z_{n0})$ ， $N_{n1}(x_{n1}, y_{n1}, z_{n1})$ 。

图 11 球心到边缘线

图 12 圆柱轴心线到边缘线

4 焊接机器人全局路径优化

4.1 问题描述

单机器人在进行路径规划时, 首先需要将路径优化问题抽象成 TSP 问题, 通过优化序列完成路径优化。TSP 问题描述为: 旅行商必须访问且只能访问每个城市一次, 并要求旅行商回到起始城市。假定 N 个城市点的集合 $\{v_1, v_2, \dots, v_n\}$, $C_{i,j}^k$ 是城市 v_i, v_j 之间的花费, TSP 的优化目的为整体花费最小, 公式可表达为

$$\min f_k = \sum_{i=1}^{N-1} C_{\pi(i), \pi(i+1)}^1 + C_{\pi(N), \pi(1)}^1 \quad (1)$$

双焊接机器人系统是从不同的起始点出发最终回到各自的起始点的 MTSP, 因此在求解时多是将 MTSP 转换为 TSP 进行求解。文献[3]指出对于双焊接机器人系统可以设置一个虚拟城市 A' , 该城市与主机机器人的出发点坐标相同但距离无穷远。虚拟城市 A' 的引入, 极大地降低了双机器人在完成路径规划时的复杂度。

本文中两个机器人对称对立摆放, 焊点的分配遵循不重复、不交叉原则。首先, 焊接机器人工作空间不重叠。其次, 在进行焊点重新分配时需要考虑焊钳姿态, 焊钳姿态相同的焊点划分在同一区域。除此姿态相同原则之外, 另一原则为两个机器人焊接时间相近, 如果此时两个机器人的焊接时间差值大于设定的最小差值, 则将距离机器人最远的焊点划分给另一个机器人, 不断循环, 直至两个机器人完成路径行走的时间相近, 总时间最短。

双焊接机器人路径规划要求两个机器人所遍历的焊点相加为全部焊点, 且两个机器人所遍历的焊点不重复。这是一个 NP-hard 问题。设焊点个数为 n , 焊接序列为 $\pi(i), (i=1, 2, \dots, n)$, 此时双机器人的时间最优路径规划可以描述为

$$\min T = \sum_{i=1}^{N-1} L_{\pi(i), \pi(i+1)} / v \quad (2)$$

式中, $\sum_{i=1}^{N-1} L_{\pi(i), \pi(i+1)}$ 是每两个焊点之间的距离之和。

如果焊钳姿态需要变换或遇到障碍物, 则 $\sum_{i=1}^{N-1} L_{\pi(i), \pi(i+1)}$ 是焊点到中间过渡点的距离。 v 为焊接速度, 其值为 2 m/s。

对于双焊接机器人系统, 除了路径长度之外, 另一个非常重要的因素就是两个机器人的焊接时间需要相近。

$$|T_1 - T_2| < T_c \quad (3)$$

式中, T_1, T_2 表示两个机器人各自的焊接时间; T_c 为焊接时间的最大差值。

其次, 必须实时监测路径, 以确保焊枪不会相互影响。为了做到这一点, 应该确定两个焊枪之间的安全距离, 只要保持距离超出安全距离, 就不会相互影响。当距离小于安全距离时, 焊接距离较短的焊接机器人将等待一段时间, 以确保两个焊枪之间的距离小于安全距离。

$$D(R_1, R_2) - d_{\text{safe}} \geq 0 \quad (4)$$

式中, R_1, R_2 分别代表两个机器人, d_{safe} 表示两个机器人的安全距离

$$D(R, W) - d_{\text{safe}} \geq 0 \quad (5)$$

式(5)表示机器人与工件和工装夹具无碰撞, 其中 W 表示工件。

综上所述, 双焊接机器人路径规划问题可表述为

$$\begin{aligned} \min T_1 &= \sum_{i=k}^{N-1} L_{\pi(i), \pi(i+1)} / v \\ T_2 &= \sum_{i=k+1}^{N-1} L_{\pi(i), \pi(i+1)} / v \end{aligned} \quad (6)$$

满足约束条件式(3)~(5)。

4.2 双焊接机器人智能路径优化

基于上述机器人与工件以及工装夹具之间的避障策略, 本文利用分组竞争粒子群算法优化机器人焊接时间, 实现时间最优避障路径规划。

为了便于计算, 在参考实际焊接时间的情况下, 本文假设机器人的运动速度 2 m/s, 完成每个焊点的焊接需要 0.5 s。时间最优路径规划如下。

(1) 初始化参数。设定两个机器人的摆放位置为在工件两侧对立摆放, 并确定焊点坐标。

(2) 焊点划分。根据姿态相同和焊接时间相近两个原则, 第一次为两个机器人分配焊点。

(3) 环境建模。运用栅格法对工件建模, 将全部栅格按照是否包含障碍物点分为障碍栅格、自由栅格。

(4) 局部路径规划。利用蚁群算法寻求局部最优无碰撞路径, 保障机器人末端与工件无碰。

(5) 碰撞检测。在机器人末端碰撞检测阶段, 通过蚁群算法寻求机器人末端与工件的无碰撞路径。在机器人各个关节碰撞检测阶段, 通过使用机器人建模、计算机器人各个关节与可能发生碰撞区域欧氏距离及几何法, 实现焊钳与工装夹具和工件之间无碰。

(6) 时间优化。利用离散化的分组竞争粒子群

算法, 初步划分的焊点, 计算各个机器人的焊接时间。

(7) 如果焊接时间相差大于设定时间差值, 则根据问题描述中的焊点划分原则, 重新划分焊点; 否则返回步骤(6)。

(8) 利用离散化的分组竞争粒子群算法, 基于新的焊点划分情况, 优化焊点顺序, 计算各个机器人的焊接时间。

本文中为了满足焊接时间最短的要求, 在对焊点划分时将焊钳姿态相同的焊点划分在一个区域中, 这样可以减少焊钳在翻转过程中所需要的时间。为了计算方便, 本文中焊钳在到达过渡点后再进行翻转, 并设定每次翻转时间为 2 s。

在优化过程中, 以机器人 2 的焊接路径为例, 焊点 1 和焊点 2 之间存在工装夹具中的支柱, 由于焊钳不能直接穿过支柱焊接, 因此需要结合机器人与工装夹具之间的几何法避障策略, 在工件边缘处选取一个过渡点, 当机器人 2 完成焊点 1 的焊接后, 移动至过渡点, 再从过渡点出发完成焊点 2 的焊接。因为焊钳在焊接焊点 1 和焊点 2 时姿态相同, 所以在这种情况下, 当焊接速度恒定为 2 m/s 时, 焊接时间最短转换为焊接路径长度最短, 故过渡点的选择满足焊接长度最短的要求。

通过分组竞争粒子群算法和几何法的避障策略, 得到机器人 1 的总焊接路径长度为: 109.29 mm, 其中避障路径长度为 57.56 mm。机器人 2 的总焊接路径长度为: 87.96 mm, 其中避障路径长度为 21.23 mm。最优焊接时间为 123.26 s, 双机器人各自的路径顺序为: 19-20-21-22-23-25-27-28-26-24-31-30-29 和 1-2-3-4-5-8-7-6-9-10-11-12-13-16-15-17-14-18。双机器人避障路径规划如图 13 所示。

图 13 双机器人焊接路径

5 结论

双焊接机器人的路径规划在实际工业应用中具有一定的应用价值, 不仅可以大大地缩短工程师前

期的调试时间, 还可以提高焊接精度和机器人工作效率。本文基于栅格法建模蚁群算法完成机器人末端与工件避障, 基于机器人建模与碰撞检测, 实现机器人各个关节与工件、工装夹具的避障。采用改进的粒子群优化算法以及焊点分区实现了焊接机器人的路径优化。文中使用的是实际工件, 研究的焊接路径优化与实际焊接情况相似, 所获得的焊接路径可以缩短焊接工程师示教时间以及提高焊接效率。

参 考 文 献

- [1] 祁若龙, 周维佳, 刘金国, 等. 基于概率论的机器人高斯运动避障轨迹规划方法[J]. 机械工程学报, 2017, 53(5): 93-100.
QI Ruolong, ZHOU Weijia, LIU Jinguo, et al. Obstacle avoidance trajectory planning for gaussian motion of robot based on probability theory[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(5): 93-100.
- [2] ULRICH M, LUX G, JÜRGENSEN L, et al. Automated and cycle time optimized path planning for robot-based inspection systems[J]. Procedia CIRP, 2016, 44(1): 377-382.
- [3] 尚伟伟, 张驰, 丛爽, 等. 工业机器人平滑抓取移动物体的运动规划系统及其方法[J]. 机械工程学报, 2018, 45(19): 10-17.
SHANG Weiwei, ZHANG Chi, CONG Shuang, et al. Motion planning for robotic smooth catching of moving object[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 45(19): 10-17.
- [4] GORENSTEIN S. Printing press scheduling for multi-edition periodicals[J]. Management Science, 1970, 16(6): 373-383.
- [5] 欧阳帆, 张铁. 双机器人协调镜像对称运动的路径规划[J]. 高技术通讯, 2013, 23(9): 960-964.
OU Yangfan, ZHANG Tie. Path planning for dual robot coordinated mirror symmetry motion[J]. High Technology Letters, 2013, 23(9): 960-964.
- [6] 李丽, 邓兴国, 尚川博. 面向能效的曲面数控加工刀具路径优化方法[J]. 机械工程学报, 2017, 53(11): 184-194.
LI Li, DENG Xingguo, SHANG Chuanbo. Tool path optimization with high-efficiency and low energy consumption for surface CNC machining[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(11): 184-194.
- [7] WANG X W, SHI Y P, DING D Y, et al. Double global optimum genetic algorithm-particle swarm optimization-based welding robot path planning[J]. Engineering Optimization, 2016, 48(2): 299-316.
- [8] ZHANG G L, HU X M, CHAI J F. Path planning algorithms and applications[J]. Modern Machinery, 2011,

- 3(5): 85-90.
- [9] 覃柯, 孙茂相, 孙昌志. 动态环境下基于改进人工势场法的机器人运动规划[J]. 沈阳工业大学学报, 2004, 26(5): 568-571.
- TAN Ke, SUN Maoxiang, SUN Changzhi. State robot motion planning based on improved artificial potential field[J]. Journal of Shenyang University of Technology, 2004, 26(5): 568-571.
- [10] 廖绍辉, 张连东. 机器人路径规划技术的现状与发展趋势[J]. 机械工程师, 2007(7): 13-16.
- LIAO Shanjun, ZHANG Liandong. Status and development trend of robot path planning technology[J]. Mechanical Engineers, 2007(7): 13-16.
- [11] 汤彬, 王学武, 薛立卡, 等. 双焊接机器人避障路径规划[J]. 华东理工大学学报, 2017, 43(3): 417-424.
- TANG Bin, WANG Xuewu, XUE Lika, et al. Dual-welding robots collision-free path planning[J]. Journal of East China University of Science and Technology, 2017, 43(3): 417-424.
- [12] 王学武, 严益鑫, 丁冬雁, 等. 基于 Lévy-PSO 算法的焊接机器人避障路径规划[J]. 上海交通大学学报, 2016, 50(10): 1517-1520.
- WANG Xuewu, YAN Yixin, DING Dongyan, et al. Welding robot path planning based on levy-PSO[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2016, 50(10): 1517-1520.
- [13] 于广东. 双工业机器人协调技术的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.
- YU Guangdong. Research on coordination technology of dual industrial robots[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014.
- [14] GOTTSCALK S. Obbtree: A hierarchical structure for rapid interference detection[C]// Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques. ACM, 1996: 171-180.
- [15] QI R L, ZHOU W J, WANG T J. An obstacle avoidance trajectory planning scheme for space manipulators based on genetic algorithm[J]. Robot, 2014, 36(3): 263-270.
- [16] QU X Y, MA L, YAO C Z. Research of collision detection algorithm based on hybrid bounding box for complex environment[C]//International Conference on Integrated Circuits and Microsystems. IEEE, 2017: 248-252.
-
- 作者简介:** 王学武(通信作者), 男, 1972 年出生, 副教授。主要研究方向为焊接机器人智能化技术、焊接自动化、智能优化算法、系统建模、控制与优化。
E-mail: wangxuewu@ecust.edu.cn
- 汤彬, 女, 1992 年出生, 硕士研究生。主要研究方向为焊接自动化。
E-mail: 13162184898@163.com
- 顾幸生, 男, 1960 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为控制理论与应用、复杂工业过程建模、控制与优化、生产计划与调度等。
E-mail: xsu@ecust.edu.cn