

DOI:10.19651/j.cnki.emt.1802281

基于改进蜂群算法的工业机器人路径规划研究*

吴方圆

(广西曙光知识产权服务有限公司 南宁 530000)

摘要: 针对工业机器人在复杂环境中运动的避障及路径优化问题,提出基于改进人工蜂群算法的工业机器人避障路径规划策略。首先针对传统人工蜂群算法搜索能力不足且容易陷入局部最优的问题,将禁忌搜索思想引入到人工蜂群算法最优解搜索过程中,形成了基于禁忌搜索的改进型人工蜂群算法,然后将其应用到工业机器人的路径规划问题中,并进行了仿真实验。结果表明,改进后的方法能够得到最优的路径,且寻优速度快、过程稳定。该方法可用于解决工业机器人路径规划问题。

关键词: 工业机器人;路径规划;禁忌搜索;蜂群算法;最优解

中图分类号: TP24;TN302 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 520.2099

Research on path planning for industrial robot based on improved bee colony algorithm

Wu Fangyuan

(Guangxi Aurora Intellectual Property Service Co., Ltd., Nanning 530000, China)

Abstract: Aiming at the obstacle avoidance and path optimization for industrial robots in complex environments, a path planning strategy for robot obstacle avoidance based on improved artificial bee colony algorithm is proposed. Firstly, aiming at the problems of lack of search ability and easy to fall into local optimum for traditional artificial bee colony algorithm, tabu search is introduced into the search process of artificial bee colony algorithm. An improved artificial bee colony algorithm based on tabu search is formed, and applied to the path planning problem of industrial robot. The results show that the improved method can obtain the optimal obstacle path of industrial robot, and the optimization speed is fast and the process is stable, which can be used to solve the problem of obstacle avoidance path planning of industrial robot.

Keywords: industrial robot; path planning; tabu search; artificial bee colony algorithm; optimum solution

0 引言

近年来,在“中国制造 2025”政策的引导下,工业机器人已广泛应用于汽车制造、电子、医疗、农业等行业,逐渐成为自动化先进装备的主流。随着工业机器人应用市场的不断扩大及用户对性能要求的不断提高,工业机器人面临着高速度、高精度、智能化的挑战,其中智能化控制成为制约机器人发展的主要瓶颈^[1-3]。路径规划属于机器人智能控制的一部分,已成为目前业界的研究热点。机器人路径规划是指在未知的复杂环境中,机器人能够按照预定的规则自动寻找出一条无碰撞的最短路径。目前,业界的许多研究学者在机器人路径规划问题中应用较多的方法为群智能控制算法,如蚁群算法、粒子群算法、蜂群算法等,其中较多

的文献集中在蜂群算法的应用上^[4-5],但采用群智能控制算法实现路径规划普遍存在的问题是局部最优解的出现,使系统陷入局部最优甚至死循环,无法进行最优路径的规划选取,特别是当周围环境较为复杂时,更容易陷入局部最优解,最短路径的选取极为困难。本文提出一种基于禁忌搜索改进人工蜂群算法的工业机器人路径规划方法,在不增加硬件设备的条件下,可以进一步得到运动的最优路径。

1 工业机器人路径规划模型建立

假设工业机器人在空间中的坐标为 (x_r, y_r) ,目标点坐标为 (x_t, y_t) ;工业机器人指向移动目标点的矢量为 \mathbf{H} ,则矢量 \mathbf{H} 的模及向角的表达式分别如下:

$$H_e = \sqrt{(x_t, y_t)^2 + (x_r, y_r)^2} \quad (1)$$

收稿日期:2018-10-22

* 基金项目:广西科技基地和人才专项(桂科 AD16380042)资助

$$\vartheta_e = \arctan(y_t - y_r / x_t - x_r) \quad (2)$$

式中: He 表示工业机器人当前位置与目标点距离的绝对值; ϑ_e 表示工业机器人当前位置与目标点之间的夹角, 根据工业机器人当前位置坐标不断修正, 下角标 e 表示时刻。

工业机器人在路径规划过程中, 通常分为趋向目标行为和智能障碍行为, 在移动过程中, 如果周围无障碍物, 就向目标点以 ϑ 角度行进移动, 若前方有障碍物时, 就引入一个增量, 记作 δ , 工业机器人在趋向目标的同时成功避开障碍物, 则:

$$\phi_e = \vartheta_e + k\delta_e \quad (3)$$

式中: ϕ_e 为预瞄准方向; k 表示比例系数; δ_e 为引入增量的大小。

设计工业机器人最短路径选取的适应度函数如下:

$$fit(x_i) = kD_e + (1-k)p_e\phi_e \quad (4)$$

式中: k 为预瞄准方向权值; D_e 为移动路径长度代价; p_e 为发生碰撞代价。设置工业机器人的移动路径包含 M 个路径节点, 则 D_e 和 p_e 的计算表达式分别为:

$$D_e = \sum_{l=1}^{M-1} \sqrt{(x_{l+1} - x_l)^2 + (y_{l+1} - y_l)^2} \quad (5)$$

$$p_e = \begin{cases} 1 & d_{\min} > D_{\text{safe}} \\ \frac{D_{\text{safe}} + 1}{d_{\min} fit(x_i) + 1} & 0 < d_{\min} \leq D_{\text{safe}} \end{cases} \quad (6)$$

式中: D_{safe} 为机器人与障碍物之间的安全距离; d_{\min} 为机器人与障碍物之间的最短距离; 获得的 fit 值越小, 得到的路径规划解越优, 即选取的工业机器人移动路径越短。

2 基于禁忌搜索的 ABC 算法改进

2.1 基本人工蜂群算法

人工蜂群算法 (artificial bee colony algorithm, ABC) 是模拟蜜蜂群体采蜜行为活动的一种智能控制算法, 通常用于路径规划及智能寻优等方面, 但由于算法本身的缺点, 即在逐步逼近全局最优解时, 具有搜索速度缓慢、种群多样性递减、容易陷入局部最优等问题^[6-9]。关于该问题, 相关人员进行了大量的探索与研究, 如文献[10]在引领蜂的搜索方程中采用了差分进化算法, 文献[11]在算法搜索后期引入一种遗传交叉因子, 文献[12]将混沌搜索算子引入到侦察蜂搜索阶段等。

ABC 法基本步骤:

1) 初始化种群: 具体公式为:

$$x_{id} = x_{id\min} + (x_{id\max} - x_{id\min})rand \quad (7)$$

式中: x_{id} 表示可行解, $d \in (1, 2, \dots, N)$; $x_{id\min}$ 和 $x_{id\max}$ 分别是 x_{id} 的上限和下限; $rand$ 为 $(0, 1)$ 之间的均匀分布。各蜜源适应度计算公式为:

$$fit(x_i) = \begin{cases} \frac{1}{1 + f(x_i)} & f(x_i) \geq 0 \\ 1 + |f(x_i)| & f(x_i) < 0 \end{cases} \quad (8)$$

式中: $fit(x_i)$ 表示第 i 个食物源 x_i 的蜜源质量, 即适应度

值; $f(x_i)$ 表示目标函数值。

2) 引领蜂搜索: 引领蜂在食物源的领域内进行有限次数的搜索, 按照式(9)产生新的食物源 $v_i (v_1, v_2, \dots, v_N)$ 。

$$v_{id} = \begin{cases} x_{id} + r_{id}(x_{id} - x_{qd}) & d = d_{\text{rand}} \\ x_{id} & \text{其他} \end{cases} \quad (9)$$

式中: q 为 $[1, N]$ 间的随机整数, 且 $q \neq i$, 根据上式产生新蜜源 $x_q = (x_{q1}, x_{q2}, \dots, x_{qD})$; d_{rand} 为 $[1, N]$ 之间的随机整数; $r_{id} \in (-1, 1)$ 用来控制引领蜂邻域搜索范围。

3) 跟随蜂搜索: 当引领蜂完成搜索后, 会记下蜜源相关信息飞回蜂巢, 将蜜源信息传递给跟随蜂, 跟随蜂以精英保留策略选择蜜源, 蜜源被选中的概率如式(10)所示。

$$p(x_i) = \frac{fit(x_i)}{\sum_{i=1}^N fit(x_i)} \quad (10)$$

4) 引领蜂和侦查蜂转换: 若引领蜂经过规定次搜索后仍然没有找到新蜜源, 表示算法陷入局部最优。此时, 引领蜂转换成侦查蜂, 继续根据式(9)生成新的蜜源。找到新蜜源后侦查蜂又转换成引领蜂, 重复上述搜索过程。如果搜索达到规定的循环次数或满足精度要求, 则程序结束, 完成搜索。

2.2 禁忌搜索算法

禁忌搜索算法 (tabu search, TS) 最早由 Glover 在 1986 年提出, 是局部邻域搜索算法的推广, 是一种基于全局的寻优算法, 能有效地避开局部最优, 防止算法陷入局部最优^[13-14]。禁忌搜索算法是在算法中设置一个禁忌表用来记录已达到的局部最优点, 并不断更新, 在后续搜索过程中, 利用禁忌表中的信息直接跳过这些点, 进而跳出局部最优解, 快速找到全局最优解^[15]。禁忌搜索算法的基本步骤是: 1) 随机产生一个初始解和若干个候选解; 2) 计算用于本次循环产生候选解的解和候选解的适应度。如果最优候选解优于上一轮循环后的全局最优解, 再判断其与禁忌表中解的欧氏距离, 若该距离大于规定阈值, 则用其代替当前解和当前全局最优解状态; 若该距离小于规定阈值, 则更新禁忌表, 继续产生新解; 3) 如果最优候选解没有优于上一轮循环后的全局最优解, 用候选解中的最优解代替当前解, 将其加入禁忌表, 同时更新禁忌表。重复上述迭代搜索过程, 直至满足停止准则。

2.3 基于禁忌搜索的 ABC 算法

ABC 算法容易陷入局部最优的根本问题在于第 4) 步引领蜂经过有限次搜索后仍然没有找到新蜜源 (此时已得到局部最优解), 转换成侦查蜂重新搜索时, 没有对已得到的局部最优解进行标记和排除, 导致下次搜索时很有可能再次陷入同样的局部最优, 进而使得搜索过程缓慢, 还有可能使算法陷入死循环。本文的设计思路为将禁忌搜索的基本思路引入到蜂群算法中, 即 TS-ABC 算法, 具体做法为在传统蜂群算法中增加一个活动的禁忌表, 该禁忌表不断标记及更新, 在后续寻优过程中若再得到这些解, 则自动跳

过,避免再次陷入局部最优。禁忌表的更新规则是:在算法第4)步,引领蜂经过规定次搜索后仍然没有找到新蜜源,则该解放入禁忌表。引领蜂转换成侦查蜂随机产生新的解,在此过程中,不断依次计算新解与禁忌表中解的欧氏距离,如果两者之间的欧氏距离小于规定阈值,则认为新解在禁忌表范围内,则更新禁忌表,同时继续重复产生新解,直到新解不属于禁忌表范围,则得到最优解。改进后的具体算法设计流程如图1所示。

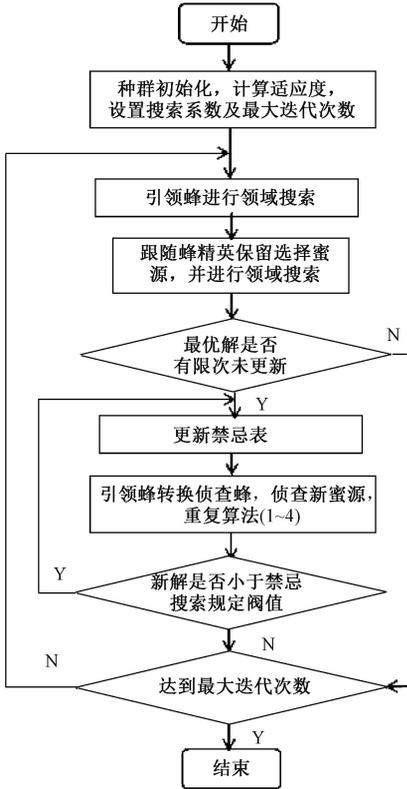


图1 TS-ABC算法流程

3 工业机器人路径规划方法实现

先随机生成 U 个可行解 (x_1, x_2, \dots, x_n) 作为工业机器人移动的初始路径, 工业机器人的移动路径 x_i 可表示为 $x_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{im})$, 然后按照算法中第2)~3)步进行引领蜂和跟随蜂的搜索, 其中引领蜂和跟随蜂通过采用自适应的搜索方法对工业机器人移动路径位置进行实时更新, 更新表达式如下:

$$V_i^j = X_i^j + \xi(X_i^j - X_k^j) \quad (11)$$

$$\xi = \xi_{\min} + G_{\max} - iter/G_{\max} (\xi_{\max} - \xi_{\min}) \quad (12)$$

式中: $\xi_{\min} = 0.2$; $\xi_{\max} = 0.7$; $iter$ 表示算法当前迭代次数; G_{\max} 表示最大迭代次数。

采用式(12)跟随蜂采用精英保留原则计算出最优结果, 对最短路径进行直接搜索, 如果工业机器人某条移动路径循环 σ 次后, 仍然没有得到更新, 则首先更新禁忌表, 然

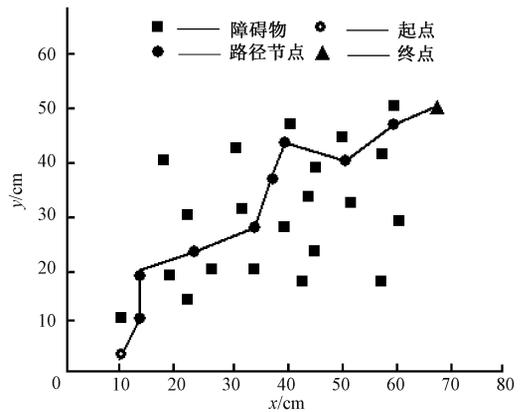
后按照禁忌搜索改进的 ABC 算法重新初始化一条新的路径; 若搜索次数达到最大迭代次数 G_{\max} , 则记录最短移动路径; 若搜索次数未满足最大迭代次数 G_{\max} , 则开始重新搜索。最后将搜索过程中得到的各个最优解节点连接起来, 即可得到工业机器人的最优路径规划。

4 实验结果分析

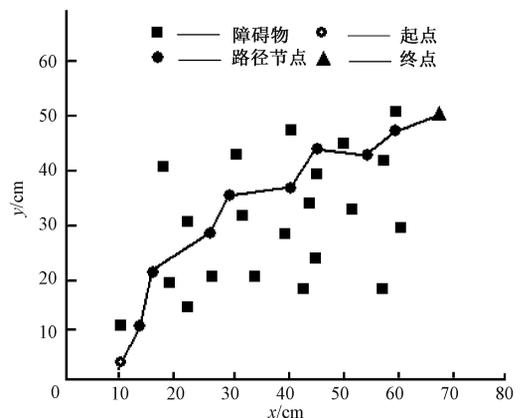
为了验证算法的有效性, 本研究采用 MATLAB 进行仿真实验。首先在实际工作站中提取某工业机器人运动过程的基本数据, 在该数据的理论基础上利用 MATLAB Robotic Toolbox 建模并进行基本参数设置, 编写程序对所设计的算法进行仿真实验, 并与传统的人工蜂群算法进行对比, 验证其有效性。

相关实验参数设置如下: 工业机器人移动路径节点数最大为 12, 移动路径长度权值为 0.5, 碰撞意向性代价权值为 0.5; 蜂群算法中蜜蜂总数为 40 只, 其中引领蜂为 20 只, 跟随蜂为 20 只; 引领蜂最大迭代次数为 40 次, 蜂群最大迭代次数为 1000 次; 新解和禁忌表中欧氏距离阈值为 1。算法迭代结束时得到的工业机器人最优路径规划如图 2 所示。

在图 2 中, 空心圆点表示起始点; 三角形点表示目标点; 小圆点小方块表示工作环境中的障碍物点, 本实验中设置 20 个障碍物; 小圆点表示路径节点。可以看出, 在算法



(a) 传统ABC规划路径



(b) TS-ABC迭代150次的规划路径

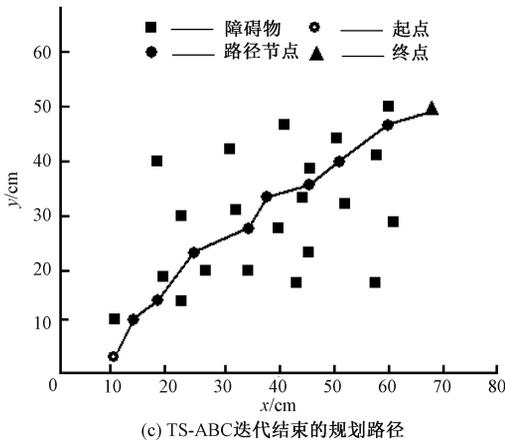


图 2 工业机器人最优路径规划结果

迭代次数结束后,图 2(a)中传统 ABC 算法在路径规划时得到的路径节点位置不够理想,路径规划效果较差,路径代价较大;图 2(b)中改进后的 TS-ABC 算法在迭代到 150 次时的路径节点位置明显有接近最优的趋势,路径规划效果较好,路径代价减小;图 2(c)中当 TS-ABC 算法结束时的路径规划效果最优,路径代价最小,可见 TS-ABC 算法的路径规划效果明显优于传统 ABC 的效果。图 3 所示为两种算法的收敛曲线,可以看出,传统人工蜂群在迭代 600 次后才趋于稳定状态,而 TS-ABC 算法在迭代 400 次后便趋于稳定状态,在收敛速度方面具有较大优势。表 1 所示为实验结果对比,可以看出 TS-ABC 算法在防碰撞可能性方面也有显著的提高。

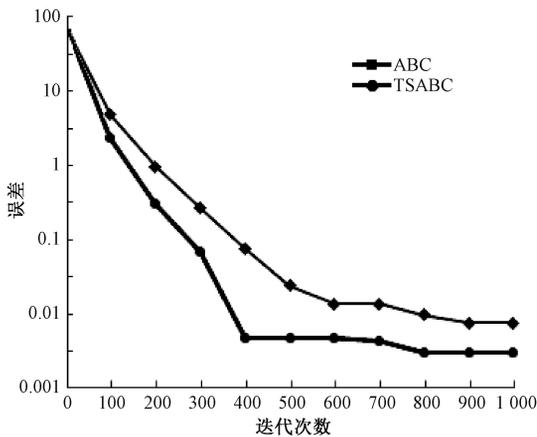


图 3 收敛曲线

表 1 实验结果对比

算法	迭代次数	最优路径长度/cm	碰撞可能性/%
ABC	600	62.732	18.599
TS-ABC	400	48.893	11.375

5 结 论

本文针对传统人工蜂群算法的缺点,提出了基于禁忌搜索改进的人工蜂群算法,并应用到工业机器人路径规划实例中,通过仿真实验验证其性能,仿真实验结果表明,TS-ABC 算法在工业机器人路径规划中的控制效果明显优于传统 ABC 算法。TS-ABC 算法能够在种群不断进化换代的过程中对工业机器人路径进行逐步优化,且在优化过程中通过不断更新禁忌表直接跳过运行过程中的局部最优解,在较短的时间内搜索到工业机器人的全局最优路径。但本研究存在的不足之处为所引入的禁忌搜索算法对于初始解的依赖程度较强,需反复初始化,找出较好的初始解,若初始解选择不理想,后期寻优效果较差,该方法还需后期进一步优化。

参考文献

- [1] 李林峰,马蕾.三次均匀 B 样条在工业机器人轨迹规划中的应用研究[J].科学技术与工程,2013,13(13):3621-3625,3646.
- [2] 游晓明,刘升,吕金秋.一种动态搜索策略的蚁群算法及其在机器人路径规划中的应用[J].控制与决策,2017,32(3):552-556.
- [3] 屈鸿,黄利伟,柯星.动态环境下基于改进蚁群算法的机器人路径规划研究[J].电子科技大学学报,2015,44(2):260-265.
- [4] 温素芳,郭光耀.基于改进人工势场法的移动机器人路径规划[J].计算机工程与设计,2015,36(10):2818-2822.
- [5] 曾明如,徐小勇,刘亮,等.改进的势场蚁群算法的移动机器人路径规划[J].计算机工程与应用,2015,51(22):33-37.
- [6] 姚江云,孔峰,王娟.工业机器人最短移动路径智能选取方法仿真[J].计算机仿真,2018,35(3):248-251,360.
- [7] PAN Q K, WANG L, LI J Q, et al. A novel discrete artificial bee colony algorithm for the hybrid flowshop scheduling problem with makespan minimisation[J]. Omega, 2014, 45(C):42-56.
- [8] GAO W F, LIU S Y, HUANG L L. Enhancing artificial bee colony algorithm using more information-based search equations [J]. Information Sciences, 2014, 270:112-133.
- [9] OZTURK C, HANCER E, KARABOGA D. A novel binary artificial bee colony algorithm based on genetic operators [J]. Information Sciences, 2015, 297:154-170.
- [10] 王海泉,胡瀛月,廖伍代,等.基于改进人工蜂群算法的机器人路径规划[J].控制工程,2016,23(9):1407-1411.

- [11] WU B, QIAN C H. Differential artificial bee colony algorithm for global numerical optimization[J]. Journal of computer, 2011, 6(5): 841-848.
- [12] 于霜, 丁力, 吴洪涛. 基于改进人工蜂群算法的无人机的航迹规划[J]. 电光与控制, 2017, 24(1): 19-23.
- [13] 陈诗军, 王慧强, 陈大伟, 等. 基于改进禁忌搜索的基站布局优化算法[J]. 计算机工程与科学, 2018, 40(2): 341-347.
- [14] 刘蓓蓓, 江铭炎, 张振月. 基于禁忌搜索的人工蜂群算法及应用[J]. 计算机应用研究, 2015, 32(7): 2005-2008.
- [15] 李阳, 范厚明, 张晓楠, 等. 求解模糊需求车辆路径问题的两阶段变邻域禁忌搜索算法[J]. 系统工程理论与实践, 2018, 38(2): 522-531.

作者简介

吴方圆, 硕士、助理研究员, 主要研究方向为工业机器人智能控制技术检索、研究与开发。

E-mail: 66704100@qq.com