

一种新型包装码垛机器人路径规划方法

魏欣, 孙玥

(南京信息职业技术学院, 南京 210023)

摘要: **目的** 为了提高码垛机器人的工作效率, 减小能量损耗, 优化机器人末端抓手的工作轨迹。**方法** 建立机器人路径规划的数学模型, 在此基础上对传统的蚁群算法进行改进, 将环境中局部的机器人路径信息引入蚁群信息素的初始化和路径选择概率中, 提高蚁群算法的收敛速度, 并防止算法早熟, 避免算法陷入局部最优。**结果** 仿真结果表明, 改进后的蚁群算法收敛速度更快, 能够在较短时间内规划出最佳路径。**结论** 所提方法能够明显提高码垛机器人最佳路径搜索能力, 对于提升机器人运行效率具有重要指导意义。

关键词: 码垛机器人; 路径规划; 蚁群算法; 局部最优

中图分类号: TB486; TP18 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2018)15-0173-05

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2018.15.026

A New Path Planning Method for Packaging Palletizing Robot

WEI Xin, SUN Yue

(Nanjing College of Information Technology, Nanjing 210023, China)

ABSTRACT: The work aims to improve the working efficiency of palletizing robot, reduce the energy loss, and optimize the work trajectory of robot end hand. Firstly, the mathematical model of robot path planning was established. On the basis of this, the traditional ant colony algorithm was improved. The local robot path information in the environment was introduced into the initialization of ant pheromone and the path selection probability, to improve the convergence speed of ant colony algorithm and prevent the algorithm from precocity, and protect the algorithm from falling into local optimum. The simulation results showed that, the improved ant colony algorithm converged faster and could plan the optimal path in a short time. The proposed method can obviously improve the optimal path searching ability of the palletizing robot, and it is of great significance to improve the operation efficiency of the robot.

KEY WORDS: palletizing robot; path planning; ant colony algorithm; local optimization

路径规划是码垛机器人运动学领域中一个重要的研究方向, 路径规划的目的是在充满障碍物的环境中寻找到一条从起始点以最短路径或最低能耗等为目标, 在避开障碍物的前提下到达目标点的最佳路径^[1-3]。根据已知的环境条件不同, 码垛机器人路径规划通常分为已知所有环境信息的全局路径规划和已知局部或完全未知环境信息的局部路径规划^[4-6]。目前国内外学者针对机器人的路径规划进行了大量的研究, 主要有网格法、人工势场法以及神经网络规划法等^[7-10]。网格法主要适用于机器人运动空间较小时, 当空间较大时需要的硬件存储空间增大, 机器人规划速度大大

下降。人工势场法在轨迹寻找过程中, 容易陷入局部最优, 从而形成死锁。神经网络规划法虽然自适应性较强, 但随着障碍物的不断增加, 导致神经网络结构过于庞大, 算法实现较为复杂。

蚁群算法是根据蚂蚁在行走路线中留下一定量信息素, 蚂蚁会根据路进行上遗留信息素多少寻找到一条最优行进路线^[11-13]。史恩秀等提出了一种算法参数相匹配的蚁群算法, 通过对不同算法参数进行仿真得到了最佳匹配参数组, 进而提高了路径规划效率^[14]。刘建华等在传统蚁群算法基础上引入了势场, 以势场引力和斥力的合力方向为信息素扩散方向, 降低对算

收稿日期: 2017-0-15

基金项目: 江苏高校品牌专业建设工程资助项目 (PPZY2015C242)

作者简介: 魏欣 (1981—), 男, 硕士, 南京信息职业技术学院副教授, 主要研究方向为嵌入式系统设计。

法参数的依赖性,降低了这些参数的耦合强度^[15]。

文中为了使码垛机器人能够寻找到一条最优路径,提出了一种智能蚁群算法的包装码垛机器人轨迹优化方法。仿真结果表明:改进后的蚁群搜索方法能够大大提高码垛机器人最佳路径搜索能力,显著提高了机器人运动效率。

1 包装码垛机器人运动学模型

包装码垛机器人是一种基于平衡四杆机构的码垛机器人本体机构,结构简图见图1。该机器人机械本体主要包括基座、机械臂和腕部机构三大部分,其中机械臂采用具有缩放功能的平行四杆机构,在满足机械臂平稳动作的同时,增大机器人末端执行器的作业空间。该机器人在不包括气动夹手的张合情况下,存在4个独立的自由度,分别为整体机构绕基座的转动,机械臂平行四杆机构的水平与竖直方向的运动及末端执行器绕腕部的转动,且机器人4个自由度分别由4台交流伺服电机驱动。



图1 码垛机器人本体结构

Fig.1 Body structure of palletizing robot

机器人运动学模型通常采用坐标变换得到,对码垛机器人各个连杆建立D-H坐标系,矩阵 T_n^{n-1} 为相邻连杆的坐标变换, T_n^{n-1} 表示为:

$$T_n^{n-1} = \begin{bmatrix} \cos\theta_n & -\sin\theta_n \cos\alpha_n & -\sin\theta_n \sin\alpha_n & q_n \cos\theta_n \\ \sin\theta_n & \cos\theta_n \cos\alpha_n & \cos\theta_n \sin\alpha_n & q_n \sin\theta_n \\ 0 & \sin\alpha_n & \cos\alpha_n & d_n \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: q_n 为连杆 n 的长度; α_n 为连杆 n 的扭角; θ_n 为连杆 $n-1$ 和连杆 n 之间的夹角; d_n 为连杆 $n-1$ 两端关节轴线的公法线和连杆 n 两关节轴线公法线之间的相对位置。将连杆的坐标变换相乘便可得到基座坐标变换矩阵:

$$T_3^0 = T_1^0 T_2^1 T_3^2 = T_1^0(\theta_1) T_2^1(\theta_2) T_3^2(\theta_3) \quad (2)$$

由式(1)可知,如果得到 T_1^0 , T_2^1 , T_3^2 ,便可得到末端执行器相对于机器人底座的相对位置姿态的

变换矩阵:

$$T_1^0 = \begin{bmatrix} \cos\theta_1 & 0 & \sin\theta_1 & 0 \\ \sin\theta_1 & 0 & -\cos\theta_1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & l_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$T_2^1 = \begin{bmatrix} \cos\theta_2 & -\sin\theta_2 & 0 & l_2 \cos\theta_2 \\ \sin\theta_2 & \cos\theta_2 & 0 & l_2 \sin\theta_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$T_3^2 = \begin{bmatrix} \cos\theta_3 & -\sin\theta_3 & 0 & l_3 \cos\theta_3 \\ \sin\theta_3 & \cos\theta_3 & 0 & l_3 \sin\theta_3 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

将式(3)、式(4)以及式(5)代入到式(2)中可以得到码垛机器人末端连杆位置姿态相对于机器人底座坐标系的变换矩阵 T_3^0 :

$$T_3^0 = \begin{bmatrix} c_1 c_2 c_3 - c_1 s_2 s_3 & -c_1 s_2 c_3 - c_1 c_2 s_3 & s_1 & l_2 c_1 c_2 + l_3 c_1 c_2 c_3 - l_3 c_1 s_2 s_3 \\ s_1 c_2 c_3 - s_1 s_2 s_3 & -s_1 s_2 c_3 - s_1 c_2 s_3 & -c_1 & l_2 s_1 c_2 + l_3 s_1 c_2 c_3 - l_3 s_1 s_2 s_3 \\ s_2 c_3 + c_2 s_3 & c_2 c_3 & 0 & l_1 + l_2 s_2 + l_3 s_2 c_3 + l_3 c_2 s_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中: $s_i = \sin \theta_i$, $c_i = \cos \theta_i$, $i=1, 2, 3$ 。

2 码垛机器人规划数学模型

假设码垛机器人在运动空间 W 中有 k 个障碍物 $O = (o_1, o_2, \dots, o_k)$, $O_{\text{obs}} = (o_1, o_2, \dots, o_k)$ 为路径上障碍物所占用的空间, $O_i \in W$, $1 < i < k$ 。设码垛机器人自由空间 W_{free} 满足 $W_{\text{free}} = \bar{O}_{\text{obs}}$ 且 $W_{\text{free}} \cap O_{\text{obs}} = \emptyset$ 。假设码垛机器人的起点位置坐标 $P_{\text{start}} = (x_{\text{start}}, y_{\text{start}})$, 目标点位置 $P_{\text{goal}} = (x_{\text{goal}}, y_{\text{goal}})$ 。设码垛机器人路径 P 由点序列 $P_{\text{path}} = (P_1, P_2, \dots, P_L)$ 组成, 其中 $P_i = (x_i, y_i)$, $i=1 \dots L$, $P_1 = P_{\text{start}}$, $P_L = P_{\text{goal}}$, 码垛机器人路径规划数学模型为:

$$\|P\| = \sum_{i=1}^{L-1} \sqrt{(x_{i+1} - x_i)^2 + (y_{i+1} - y_i)^2} \quad (7)$$

$$C(P) = 0$$

$$\min J = \|P\|$$

式中: $\|P\|$ 为机器人运动路径上两点之间的距离; $C(P)$ 为机器人运动路径上的约束条件, $C(P)$ 为:

$$C(P) = \begin{cases} 1 & \exists s, 1 \leq s \leq L, p_s \in O_{\text{obs}} \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (8)$$

由式(8)可以看出,码垛机器人路径规划可以看成约束条件 $C(P)$ 下,即在运动过程中在避免碰撞障碍物条件下,寻找一条到达目标点的最短路径 $\|P\|$ 。

3 码垛机器人蚁群路径规划

在 t 时刻,蚂蚁由位置 i 运动到位置 j 的概率为

$$p_{i,j}^k(t):$$

$$p_{i,j}^k(t) = \begin{cases} \left(\tau_{i,j}^\alpha(t) \eta_{i,j}^\beta(t) \right) / \sum_{j \in Q_k} \tau_{i,j}^\alpha(t) \eta_{i,j}^\beta(t) & j \in Q_k \\ 0 & \text{否则} \end{cases} \quad (9)$$

式中： α 为信息启发算子； β 为期望启发算子； $j \in Q_k$ 为蚂蚁 k 下一步可以选择的路径； $\tau_{i,j}(t)$ 为路径 ij 上蚂蚁遗留的信息量； $\eta_{i,j}(t)$ 为路径之间转移的期望程度。

在传统蚁群算法中， $\eta_{i,j}(t)$ 被设置为 $\eta_{i,j}(t) = 1/d_{i,j}$ ，为了提高算法搜索最佳路径的随机性，文中提出了一种新型的 $\eta_{i,j}(t)$ 选取方法：

$$\eta_{i,j}(t) = \begin{cases} 1/d_{i,j}, & d_{i,j} \leq \bar{d}_i \\ 1/\bar{d}_i, & d_{i,j} > \bar{d}_i \end{cases} \quad (10)$$

其中：

$$\bar{d}_i = \frac{1}{n} \sum_{h=1 \dots j \dots n} d_{i,h} \quad (11)$$

式中： $\bar{d}_i$ 为与规划路径上所有目标点与路径点 i 相连的距离之和的均值。

当路径点 i 到路径点 j 的距离 $d_{i,j}$ 小于 $\bar{d}_i$ 时，则应该加大选择该条路径的概率， $d_{i,j}$ 越小，则码垛机器人选择该条路径的概率越大；当 $d_{i,j}$ 大于 $\bar{d}_i$ 时， $1/d_{i,j}$ 的值越小，此时机器人选择该条路径概率较小，但算法容易使机器人陷入局部最小值，为了避免该缺陷，选择 $\eta_{i,j}(t)$ 为常数，且 $\eta_{i,j}(t) = 1/d_{i,j}$ ，从而大大增加了较差轨迹选择的概率，从而可以保证码垛机器人在寻优过程中过早地陷入局部极小值。

为了提升传统算法的收敛速度，文中提出了一种新的 $\tau_{i,j}$ 初始化分配方法：

$$\begin{cases} \tau_{i,j}(0) = Z \cdot M_j \\ Z = \frac{d_{i,j}}{\Delta \sum_{i,j \in n} d_{i,j}} \end{cases} \quad (12)$$

式中： $d_{i,j}$ 为路径上路径点 ij 的距离； $\Delta \sum_{i,j \in n} d_{i,j}$ 为所有路径点距离的均值； M_j 为与路径点 j 相连接的所有路径条数。

蚁群在完成一个完整的路径循环后，算法会得到一个最优解 l_{BEST} 和最差解 l_{WORST} ，则由式 (13) 对路径上遗留的信息激素进行更新。

$$l_{s \rightarrow g} \leq \frac{l_{\text{BEST}} + l_{\text{WORST}}}{2} \quad (13)$$

利用式 (14) 对蚁群路径上的每一段路径中的信息激素更新：

$$\tau_{i,j}(t+1) = \rho \tau_{i,j}(t) + \Delta \tau_{i,j} \quad (14)$$

式中： ρ 为路径上信息激素中残留算子； $\Delta \tau_{i,j}$ 为路径上信息激素的量。

其中：

$$\Delta \tau_{i,j} = \begin{cases} \varepsilon \cdot \frac{Q}{d_{i,j}} & \text{若蚂蚁经过路径 } i \rightarrow j \\ 0 & \text{否则} \end{cases} \quad (15)$$

$$\varepsilon = \begin{cases} d_j^{\min} / d_{i,j} & M_j \geq M_i \\ d_i^{\min} / d_{i,j} & M_j < M_i \end{cases} \quad (16)$$

式中： $d_j^{\min}$ 为与路径中与路径点 j 相连的所有路径中最短路径长度； M_i 为与节点 i 连接的路径数量。

通过式 (13—16) 可知，通过以上改进可以使算法在路径寻优过程中让部分最优路径中的信息量增加，从而可以使机器人能够根据路径中的信息量进行调整，从而有效避免了路径上信息量的过于集中，从而提高了算法的收敛速度并避免算法过快的陷入局部最优。

4 仿真分析

为了验证该算法对于码垛机器人路径规划的有效性，进行了相关的仿真实验。假设机器人运动路径上的障碍均分布在 20×20 的正方形环境中。算法参数设置为：蚂蚁数量 $k=20$ ，信息启发算子 $\alpha=1$ ，期望启发算子 $\beta=4$ ；信息素残留算子 $\rho=0.7$ 。基于以上参数设置分别采用传统蚁群算法和改进后的蚁群算法进行机器人路径仿真分析。仿真结果见图 2 和图 3。

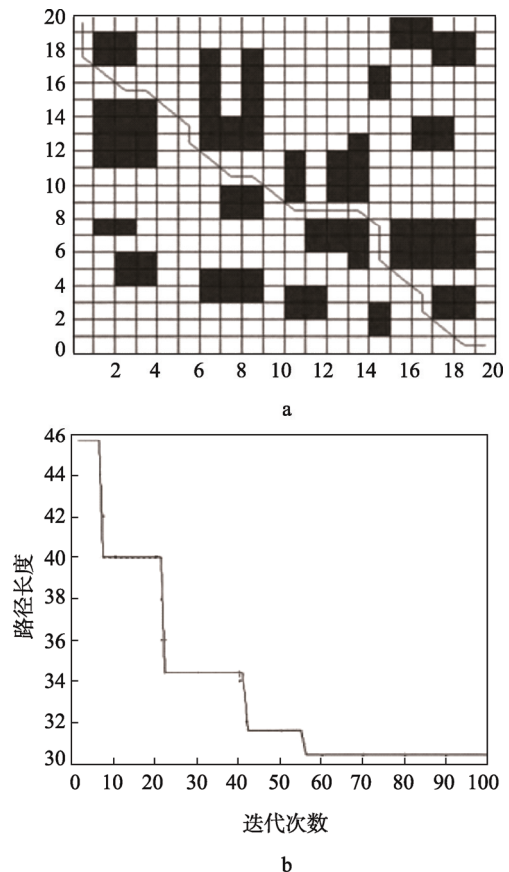


图 2 传统蚁群算法寻优路径

Fig.2 Optimization path of traditional ant colony algorithm

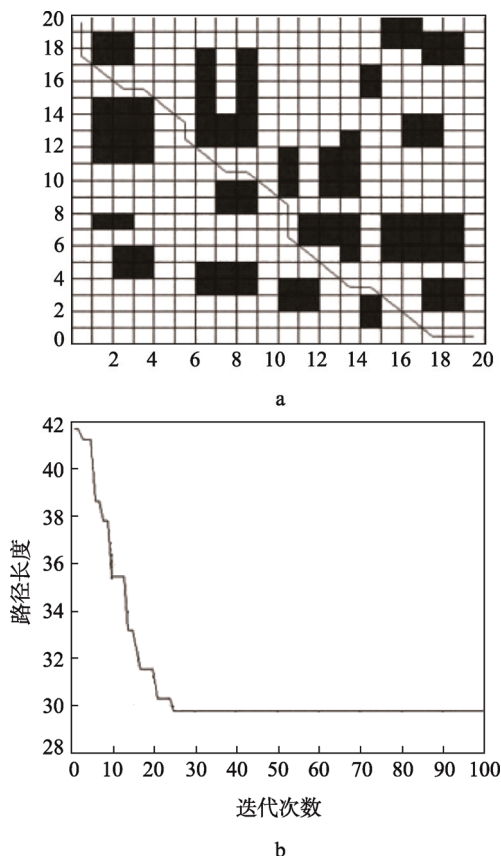


图3 改进蚁群算法寻优路径

Fig.3 Optimization path for improved ant colony algorithm

由图2和图3对比可以看出,改进蚁群算法下的机器人路径规划相比于传统蚁群算法具有更强的寻优能力,找到的路径更短,大大提高了机器人运行效率;改进蚁群算法的迭代图中具有更多的“锯齿”,在同样的路径长度下迭代次数相比传统蚁群算法大大减小,从而说明改进蚁群算法具有更强的全局搜索能力;当算法陷入局部最优解时,改进蚁群算法能够迅速跳出局部最优,并继续搜索全局最优解,相比于传统算法,改进蚁群算法能够显著提高搜索效率和收敛速度,具有较强的适应性。

5 结语

将蚁群算法应用于包装码垛机器人的路径规划中,并针对传统蚁群算法易陷入局部最优等问题,提出了一种新型蚁群路径规划方法,在路径寻优过程中让部分最优路径中的信息量增加,从而可以使机器人能够根据路径中的激素信息进行自适应调整,从而有效避免了路径上信息量的过于集中,从而提高了算法的收敛速度并避免算法过快的陷入局部最优。仿真结果表明改进后的蚁群算法能够在很短时间内找到一条满足多个约束条件的最优路径,大大提升了蚁群算法收敛速度,并能保证机器人末端执行器在复杂的工作环境中有效避开障碍物达到目标位置。

参考文献:

- [1] WANG Z Q, ZHU X G, HAN Q Y. Mobile Robot Path Planning Based on Parameter Optimization Ant Colony Algorithm[J]. Procedia Engineering, 2011, 15(8): 2738—2741.
- [2] ABIYEV R, IBRAHIM D, ERIN B. Navigation of Mobile Robots in the Presence of Obstacles[J]. Advances in Engineering Software, 2010, 41(10): 1179—1186.
- [3] LIKHACHEV M, FERGUSON D, GORDON G, et al. Anytime Search in Dynamic Graphs[J]. Artificial Intelligence, 2008, 172(14): 1613—1643.
- [4] 张明, 何庆中, 郭帅. 酒箱码垛机器人的机构设计与运动仿真分析[J]. 包装工程, 2013, 34(1): 83—87.
ZHANG Ming, HE Qing-zhong, GUO Shuai. Mechanical Design and Motion Simulation Analysis of Liquor Automated Production Line Palletizing Robot[J]. Packaging Engineering, 2013, 34(1): 83—87.
- [5] 徐海黎, 解祥荣, 庄键, 等. 工业机器人的最优时间与最优能量轨迹规划[J]. 机械工程学报, 2010, 46(9): 19—25.
XU Hai-li, XIE Xiang-rong, ZHUANG Jian, et al. Global Time-energy Optimal Planning of Industrial Robot Trajectories[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(9): 19—25.
- [6] CHEN C S, CHEN L Y. Cross-coupling Position Command Shaping Control in a Multi-axis Motion System[J]. Mechatronics, 2011, 21: 625—632.
- [7] CHWA D, JUNHO K, JIN Y C. Online Trajectory Planning of Robot Arms for Interception of Fast Maneuvering Object under Torque and Velocity Constraints[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, And Cybernetics, 2005, 35(6): 831—843.
- [8] 朱庆保. 复杂环境下的机器人路径规划蚂蚁算法[J]. 自动化学报, 2006(4): 586—593.
ZHU Qing-bao. Ant algorithm for Path Planning of Mobile Robot in a Complex Environment[J]. Acta Automatica Sinica, 2006(4): 586—593.
- [9] 赵娟平, 高宪文, 刘金刚, 等. 码垛机器人路径规划的参数模糊自适应窗口蚁群优化算法[J]. 控制与决策, 2011, 26(7): 1096—1100.
ZHAO Juan-ping, GAO Xian-wen, LIU Jin-gang, et al. Parameters Self-adaptive Fuzzy ant Colony Optimization Algorithm with Searching Window for Path Planning of Mobile Robot[J]. Control and Decision, 2011, 26(7): 1096—1100.
- [10] 屈正庚, 杨川. 基于改进蚁群算法的码垛机器人全局轨迹规划研究[J]. 南京师大学报(自然科学版), 2015, 38(1): 81—84.
QU Zheng-geng, YANG Chuan. Research on Global Path Planning for Mobile Robot Based on Improved Ant Colony Optimization Algorithm[J]. Journal of Nanjing Normal University (Natural Science Edition), 2015, 38(1): 81—84.

- [11] 潘杰, 王雪松, 程玉虎. 基于改进蚁群算法的移动码垛机器人路径规划[J]. 中国矿业大学学报, 2012, 41(1): 108—113.
PAN Jie, WANG Xue-song, CHENG Yu-hu. Improved Ant Colony Algorithm for Mobile Robot Path Planning[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2012, 41(1): 108—113.
- [12] 张琦, 马家辰, 谢玮. 基于改进蚁群算法的码垛机器人路径规划[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2013, 34(11): 1521—1524.
ZHANG Qi, MA Jia-cheng, XIE Wei. Improved Ant Colony Algorithm-based Path Planning for Mobile Robot[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2013, 34(11): 1521—1524.
- [13] TUNCER A, YILDIRIM M. Dynamic Path Planning of Mobile Robot with Improved Genetic Algorithm[J]. Computers & Electrical Engineering, 2012, 38(6): 1564—1572.
- [14] 史恩秀, 陈敏敏, 李俊. 基于蚁群算法的移动机器人全局路径规划方法研究[J]. 农业机械学报, 2014, 45(6): 53—57.
SHI En-xiu, CHEN Min-min, LI Jun. Research on Method of Global Path-planning for Mobile Robot Based on Ant-colony Algorithm[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(6): 53—57.
- [15] 刘建华, 杨建国, 刘华平. 基于势场蚁群算法的移动机器人全局路径规划方法[J]. 农业机械学报, 2015, 46(9): 18—27.
LIU Jian-hua, YANG Jian-guo, LIU Hua-ping. Robot Global Path Planning Based on Ant Colony Optimization with Artificial Potential Field[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(9): 18—27.