

文章编号:1007-5321(2020)05-0034-07

DOI:10.13190/j.jbupt.2020-069

基于改进遗传算法的移动机械臂拣选路径优化

王怀江, 刘晓平, 王刚, 韩松

(北京邮电大学 自动化学院, 北京 100876)

摘要: 传统移动机械臂路径规划算法没有根据抓取点分布情况对工位点坐标进行优化,效率低,对此,提出了一种基于改进遗传算法的移动机械臂拣选路径优化方法. 通过对拣选物品位置的分析,建立单个工位点上移动机械臂分拣路径模型和多工位点的旅行商(TSP)问题模型,运用改进的遗传算法,在工作空间内对各个工位点的位置坐标寻优,规划出移动机械臂抓取的最短路径和多工位点间移动的最短路径. 实验结果表明,与传统遗传算法可能,运用改进的等级进化选择算子和最优近邻交叉算子,遗传算法的收敛速度提高了46.15%,路径缩短了45.99%,系统运行时间减少了25.80%,提高了系统效率.

关键词: 物流分拣; 移动机械臂; 路径规划; 遗传算法

中图分类号: TG156

文献标志码: A

Optimization of Mobile Manipulator Sorting Path Based on Improved Genetic Algorithm

WANG Huai-jiang, LIU Xiao-ping, WANG Gang, HAN Song

(School of Automation, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

Abstract: Path planning is the core technology of mobile manipulators. Aiming at the problem of the traditional fixed-station mobile manipulator planning algorithms, a method for optimizing the picking path of mobile manipulators based on improved genetic algorithm is proposed. By analyzing the position of items to be picked, a sorting path model of mobile manipulators at a single station and a traveling salesman problem(TSP) model for multiple stations are established. An improved genetic algorithm is used to optimize the station coordinates in the workspace, which planned the shortest path grasped by the mobile robot arm and moved between multi-station points. Experiments show that, by using the improved hierarchical evolution selection operator and the optimal nearest neighbor crossover operator, compared with the traditional genetic algorithm, the convergence speed is increased by 46.15%, the path is shortened by 45.99%, and the system running time is reduced by 25.80%. That improved system efficiency.

Key words: logistics sorting; mobile manipulator; path planning; genetic algorithm

移动机械臂由安装在移动基座上的机械臂组成. 由于移动机械臂同时具备灵活的移动性和操纵能力,使得移动机械臂的应用领域不断扩大. 随着

科技的发展和电商行业崛起的背后,需要大规模、高效率的物流行业作为后盾支撑,而物流行业中货物的拣选需要大量人力,其任务繁重、工作量大、环境

收稿日期: 2020-06-15

基金项目: 北京市科研项目(201702001); 北京邮电大学青年科研创新计划专项项目(2017RC22)

作者简介: 王怀江(1996—),男,硕士生.

通信作者: 刘晓平(1965—),男,教授,博士生导师, E-mail: liuxp@bupt.edu.cn.

$$\left. \begin{aligned} C_{1,1} &= (a_{1,1}, b_{1,1}, c_{1,1}) \cdots C_{1,m_1} = (a_{1,m_1}, b_{1,m_1}, c_{1,m_1}) \\ C_{2,1} &= (a_{2,1}, b_{2,1}, c_{2,1}) \cdots C_{2,m_2} = (a_{2,m_2}, b_{2,m_2}, c_{2,m_2}) \\ &\vdots \\ C_{n,1} &= (a_{n,1}, b_{n,1}, c_{n,1}) \cdots C_{n,m_n} = (a_{n,m_n}, b_{n,m_n}, c_{n,m_n}) \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

1.2 移动机械臂拣选建模及分析

通过分析抓取区域内的待抓取物品分布,对于如图1所示多个分拣区,规划移动机械臂底盘的移动路径,具体流程如图2所示。

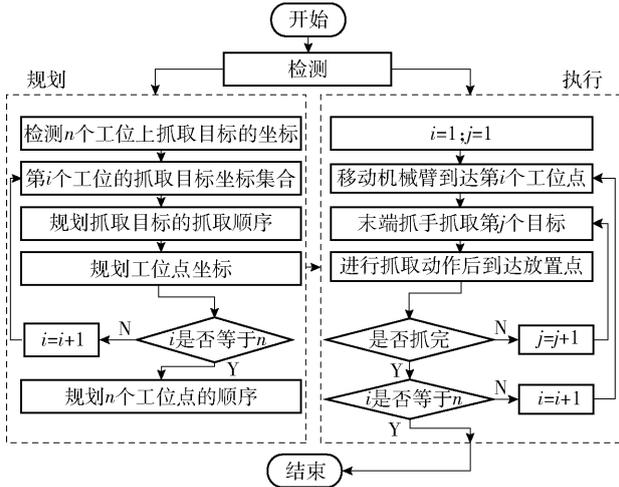


图2 移动机械臂分拣流程

S_i 集中所有工位点的欧氏距离总和,即移动机械臂底座移动总路径为

$$L_1 = \sum_{i=1}^{n-1} d(P_i, P_{i+1}) + d(P_n, P_1) \quad (5)$$

其中 d 表示两点间欧氏距离。

机械臂末端从抓取到放置所用总路径为

$$L_2 = L_{2,1} + L_{2,2} + \cdots + L_{2,t} + \cdots + L_{2,T} \quad (6)$$

其中

$$\begin{aligned} L_{2,t} &= \sqrt{(a_{t,1} - a_{b,t})^2 + (b_{t,1} - b_{b,t})^2 + (c_{t,1} - c_{b,t})^2} + \\ &\sqrt{(a_{t,1} - a_{p,t})^2 + (b_{t,1} - b_{p,t})^2 + (c_{t,1} - c_{p,t})^2} + \\ &2(\sqrt{(a_{t,2} - a_{p,2})^2 + (b_{t,2} - b_{p,2})^2 + (c_{t,2} - c_{p,2})^2} + \cdots + \\ &\sqrt{(a_{t,n} - a_{p,t})^2 + (b_{t,n} - b_{p,t})^2 + (c_{t,n} - c_{p,t})^2}) + \\ &\sqrt{(a_{b,1} - a_{p,t})^2 + (b_{b,1} - b_{p,t})^2 + (c_{b,1} - c_{p,t})^2} \quad (7) \end{aligned}$$

其中 $t=1, 2, \dots, T$ 。

从式(7)中得出,当移动机械臂在某一工位点底盘坐标确定后,即 $a_{b,t}, a_{p,t}$ 也随之确定, $L_{2,t}$ 的长度此时取决于式(7)前两项之差,即第1个抓取点到初始与第1个抓取点到放置点的距离之差。通过寻找最小的差值,可以确定在工位点上第1个抓取

的目标。而需要注意的是,当工位点变化后, $a_{b,t}, a_{p,t}$ 也随之变化,此时第1个抓取点也会改变。下文将对如何确定工位点的坐标及其对应的抓取顺序作进一步讨论。

2 拣选算法设计

运用改进的遗传算法,在移动机械臂工作空间范围内寻找最优工位点及其对应的最优抓取顺序,最后优化多个工位点移动路径。

2.1 工位点上多目标抓取建模及顺序优化

例如在 P_1 工位点,移动机械臂末端抓手的抓取总路径为 $L_{2,1}$,由 $L_{2,1}$ 的表达式可知,工位点的抓取顺序会影响 $L_{2,1}$ 的大小。如当第1个抓取点为 $(a_{1,1}, b_{1,1}, c_{1,1})$ 时,

$$\begin{aligned} L_{2,1,1} &= \sqrt{(a_{1,1} - a_{b,1})^2 + (b_{1,1} - b_{b,1})^2 + (c_{1,1} - c_{b,1})^2} + \\ &\sqrt{(a_{1,1} - a_{p,1})^2 + (b_{1,1} - b_{p,1})^2 + (c_{1,1} - c_{p,1})^2} + \\ &2\sqrt{(a_{1,2} - a_{p,1})^2 + (b_{1,2} - b_{p,1})^2 + (c_{1,2} - c_{p,1})^2} + \cdots + \\ &2\sqrt{(a_{1,n} - a_{p,1})^2 + (b_{1,n} - b_{p,1})^2 + (c_{1,n} - c_{p,1})^2} + \\ &\sqrt{(a_{b,1} - a_{p,1})^2 + (b_{b,1} - b_{p,1})^2 + (c_{b,1} - c_{p,1})^2} \quad (8) \end{aligned}$$

当第1个抓取点为 $(a_{1,2}, b_{1,2}, c_{1,2})$ 时,

$$\begin{aligned} L_{2,1,2} &= \sqrt{(a_{1,2} - a_{b,1})^2 + (b_{1,2} - b_{b,1})^2 + (c_{1,2} - c_{b,1})^2} + \\ &\sqrt{(a_{1,2} - a_{p,1})^2 + (b_{1,2} - b_{p,1})^2 + (c_{1,2} - c_{p,1})^2} + \\ &2\sqrt{(a_{1,1} - a_{p,1})^2 + (b_{1,1} - b_{p,1})^2 + (c_{1,1} - c_{p,1})^2} + \cdots + \\ &2\sqrt{(a_{1,n} - a_{p,1})^2 + (b_{1,n} - b_{p,1})^2 + (c_{1,n} - c_{p,1})^2} + \\ &\sqrt{(a_{b,1} - a_{p,1})^2 + (b_{b,1} - b_{p,1})^2 + (c_{b,1} - c_{p,1})^2} \quad (9) \end{aligned}$$

由式(8)和式(9)可得

$$\begin{aligned} L_{2,1,1} - L_{2,1,2} &= \\ &\sqrt{(a_{1,1} - a_{b,1})^2 + (b_{1,1} - b_{b,1})^2 + (c_{1,1} - c_{b,1})^2} - \\ &\sqrt{(a_{1,1} - a_{p,1})^2 + (b_{1,1} - b_{p,1})^2 + (c_{1,1} - c_{p,1})^2} - \\ &(\sqrt{(a_{1,2} - a_{b,1})^2 + (b_{1,2} - b_{b,1})^2 + (c_{1,2} - c_{b,1})^2} - \\ &\sqrt{(a_{1,2} - a_{p,1})^2 + (b_{1,2} - b_{p,1})^2 + (c_{1,2} - c_{p,1})^2}) \quad (10) \end{aligned}$$

即比较的是从起始位置出发到抓取点 $(a_{1,1}, b_{1,1}, c_{1,1})$ 减去从 $(a_{1,1}, b_{1,1}, c_{1,1})$ 到放置点的差,与从起始位置出发到抓取点 $(a_{1,2}, b_{1,2}, c_{1,2})$ 减去从 $(a_{1,2}, b_{1,2}, c_{1,2})$ 到放置点的差。即令

$$\begin{aligned} d_1 &= \sqrt{(a_{1,1} - a_{b,1})^2 + (b_{1,1} - b_{b,1})^2 + (c_{1,1} - c_{b,1})^2} - \\ &\sqrt{(a_{1,1} - a_{p,1})^2 + (b_{1,1} - b_{p,1})^2 + (c_{1,1} - c_{p,1})^2} \\ d_2 &= \sqrt{(a_{1,2} - a_{b,1})^2 + (b_{1,2} - b_{b,1})^2 + (c_{1,2} - c_{b,1})^2} - \end{aligned}$$

$$d_n = \frac{\sqrt{(a_{1,2} - a_{p,1})^2 + (b_{1,2} - b_{p,1})^2 + (c_{1,2} - c_{p,1})^2} \dots \sqrt{(a_{1,n} - a_{b,1})^2 + (b_{1,n} - b_{b,1})^2 + (c_{1,n} - c_{b,1})^2}}{\sqrt{(a_{1,n} - a_{p,1})^2 + (b_{1,n} - b_{p,1})^2 + (c_{1,n} - c_{p,1})^2}} \quad (11)$$

所以

$$\min(L_{2,1}) = \min\{d_1, d_2, \dots, d_n\} + 2 \sum_{i=1}^n \frac{\sqrt{(a_{1,i} - a_{p,1})^2 + (b_{1,i} - b_{p,1})^2 + (c_{1,i} - c_{p,1})^2} + \sqrt{(a_{b,1} - a_{p,1})^2 + (b_{b,1} - b_{p,1})^2 + (c_{b,1} - c_{p,1})^2}}{\dots} \quad (12)$$

通过比较找到 $\min\{d_1, d_2, \dots, d_n\}$, 从而确定首个抓取点, 剩下目标点的顺序对 $\min(L_{2,1})$ 不会产生影响。

2.2 最优工位点选取及多工位点路径优化

2.2.1 路径建模

假设在所有抓取目标都能够被抓取的前提下, 将工位点的 P_1, P_2, \dots, P_n 坐标 (见式(2)) 设为满足工作空间的 $(x_t, y_t) (t=1, 2, \dots, n)$, 又因为式(3)中 G_b, G_p 都与 P_1, P_2, \dots, P_n 相关 (抓手的起始位置和放置位置是相对于移动机械臂坐标系的坐标), 由式(2)和式(7)可知, 优化目标函数可以表示为

$$L_{2,t} = L_{2,t}(x_t, y_t) \quad (13)$$

由式(13)根据各个工作台上抓取点位置, 得到优化后的工位点坐标 $(x_t, y_t) (t=1, 2, \dots, n)$, 移动机械臂在多个工位点间的移动顺序对移动的总路径有很大影响, 由式(5)建立移动机械臂多工位点移动的 TSP 模型, 设 W 为工位点的一组移动序列, T_d 为此序列下的移动路径:

$$W = (S_1, S_2, \dots, S_n) \quad (14)$$

$$T_d = \sum_{i=1}^{n-1} d(S_i, S_{i+1}) + d(S_n, S_1) \quad (15)$$

其中 $d(S_i, S_{i+1})$ 为工位点 S_i 到工位点 S_{i+1} 的距离。式(15)即为需要优化的 TSP 模型。

2.2.2 改进遗传算法的路径优化

遗传算法是一种模拟自然选择和遗传变异的有效方法, 根据适者生存原理, 通过种群进化得到最优解。遗传算法流程如图 3 所示, 在可行解空间中以编码的形式表示每一组解。该算法的个体可以表示为移动机械臂的一个可行路径。序数编码方法^[7]很少有局部极值的问题, 并且有唯一的自然数描述, 被广泛用于识别个体。采用序数法对单个路径进行

编码。每个工位点都标有唯一的编号, 每个编号代表移动机械臂走过的顺序。个体的适应度值反映了个体的优势和劣势。适应度值最高的个体作为最优解, 经过多次选择、杂交、变异和输出得到。适应度函数在优化求解过程中起着关键作用。在移动机械臂工位点优化过程中以机械臂抓取路径最短为目标, 为保证适应度函数与路径距离正相关, 由式(13), 定义适应度函数为

$$f_1 = \frac{1}{\min L_{2,t}(x_t, y_t)} \quad (16)$$

在移动机械臂多工位点路径规划的研究中, 需要获取路径长度信息以获得最短路径。为保证适应度函数与路径距离正相关, 由式(5)定义适应度函数为

$$f_2 = \frac{1}{\min L_1} \quad (17)$$

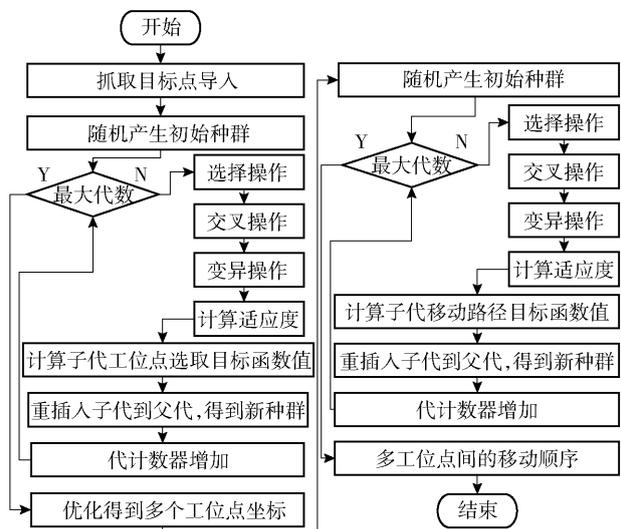


图 3 遗传算法流程

2.2.3 等级进化选择算子改进

进化过程中, 适应度值高的个体从第 1 代种群中选择遗传给下一代^[8]。当代种群中适应度最低的个体经过交叉、变异等操作后, 将被选择的个体替换。常用的计算适应度比例选择算子的方法包含以下 3 个步骤:

- 1) 计算所有个体适应度值, 并求总数;
- 2) 在 0 和总数之间产生一个随机数, 记为 m ;
- 3) 从种群中的第 1 个个体开始, 计算所有适应度值的和, 直到结果等于或大于 m 。

可以看出, 随机数 m 对被选择个体的数量有很大的影响。当 m 较小时容易陷入局部最优, 当 m 较大时计算较为复杂。针对这一问题, 结合等级进化

思想,设计了一种改进的选择算子. 将个体选择概率记为 P_i , 定义为

$$P_i = \frac{f_i}{\sum_{i=1}^M f_i} \quad (18)$$

其中: M 为种群规模, f_i 为个体适应度值.

改进选择算子的伪代码如下.

输入: 所有个体对应适应度 f_i ;
种群大小 M ;

过程:

- 1 从 $[0, M]$ 区间产生一个随机整数, 记作 k ;
- 2 计算 $P_i = \frac{f_i}{\sum_{i=1}^M f_i}$;
- 3 对 $P_{i(i=1,2,\dots,M)}$ 从大到小进行排序;
- 4 将重新排序的 $P_{i(i=1,2,\dots,M)}$ 分成 4 个小部分
- 5 for $n = 1, 2, 3, 4$ do
- 6 $B_n = \sum_{i=1}^{M/4} P_{in}$;
- 7 从第 n 部分选取 kB_n 个个体记为 S_n ;
- 8 end for

输出: $Select = [S_1, S_2, S_3, S_4]$

2.2.4 最优近邻交叉算子

交叉是指基因重组, 使被选择的个体交叉配对, 产生新的个体. 常用的交叉操作有部分匹配交叉、循环交叉和顺序交叉. 计算顺序交叉算子包括以下 4 个步骤:

1) 随机选择 2 个插入点 α 和 β (见图 4);

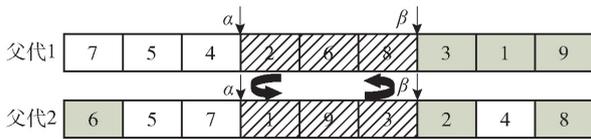


图 4 随机点插入示意图

2) 交换 2 个插入点中间部分的编码, 替换其余重复编码 (见图 5);

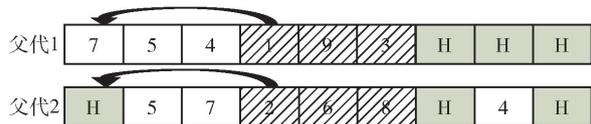


图 5 交换编码示意图

3) 从第 1 个插入点 α 开始重新排序, 插入点的中间部分放入 H 码 (见图 6);

4) 根据对应关系确定 H 代表的编码, 得到子

代 (见图 7).



图 6 重新排序示意图



图 7 子代编码示意图

顺序交叉算子具有较大的随机性, 存在着一些适应度值较小的子代. 针对这一不足, 笔者根据贪心算法^[9]的原理, 设计了一种改进型最优近邻交叉算子, 即在每个操作回路中, 只能选择适应度值最高的相邻工位点作为下一个到达的工位点. 2 个父代记作 $A_1 = (a_{11}, a_{12}, \dots, a_{1n})$ 和 $A_2 = (a_{21}, a_{22}, \dots, a_{2n})$, 交叉所产生的子代记作 a_1 和 a_2 , 随机交叉点为 α , 两边工位点记作 $a_{11}, a_{12}, a_{r1}, a_{r2}$ 与 α 的距离记作 d_1, d_2, d_3, d_4 , 改进顺序交叉算子的过程如图 8 所示.

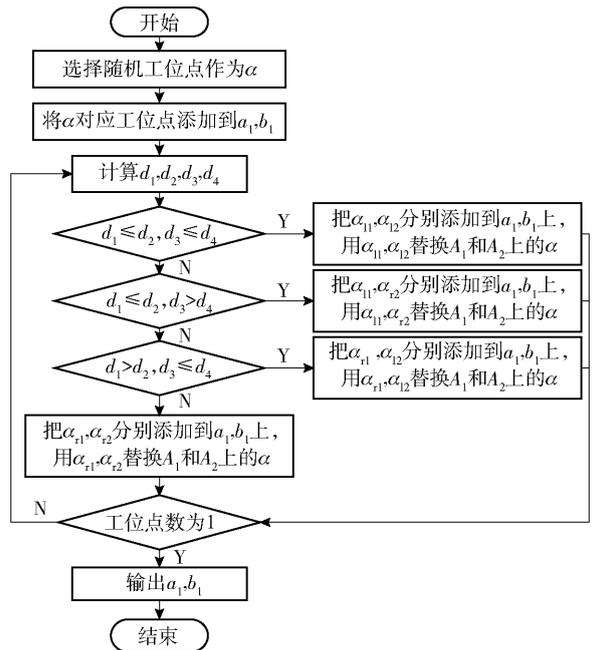


图 8 最优近邻交叉算子流程

通过上述流程图可以得到子代 a_1 的编码. 类似地, 子代 a_2 可以通过选择随机交叉工位点 β 得到. 改进后的杂交算子保证了杂交后的子代具有更高的适应度值, 从而以更快的收敛速度找到最优解. 一般可通过适当增加突变概率和采用尽可能多的变异

类型来避免局部最优困境。

3 仿真实验结果与分析

3.1 基于改进遗传算法的最优工位点选取算法实验

根据实验室自主设计的移动机械臂实验平台，在 Matlab 仿真环境下，运用随机函数生成 20 个抓取点 ($-0.5 < x < 0.5, -0.5 < y < 0.5, z = 1$)，优化算法中将目标工位点坐标设为 (X, Y) ，将移动机械臂末端抓手起始点和抓取放置点分别设为相对于工位点坐标的 $(X - 0.3, Y, 1)$ 和 $(X + 0.3, Y, 1)$ ，搜索空间的横坐标范围为 $[-0.5, 0.5]$ ，纵坐标范围为 $[-1.5, -1.0]$ 。

如图 9 所示，2 种算法最后都收敛于相同的适应度值，说明改进遗传算法不是局部最优，而且相比于传统遗传算法收敛于第 124 代，改进后的算法在第 29 代便收敛到最优值，收敛代数减少了 95 代。图 10 所示为最优工位点进化寻优后的种群分布结果，虚线区域为最优坐标及周围聚集的点。

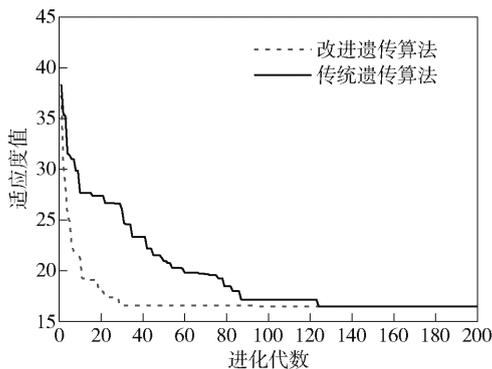


图 9 优化过程对比分析

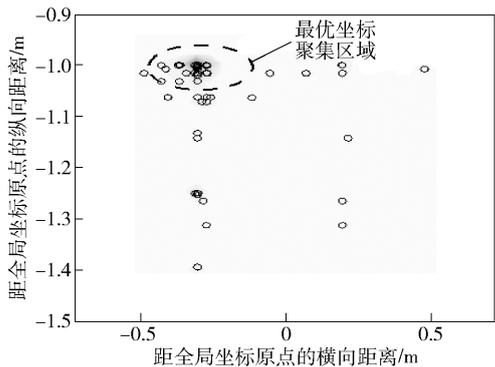


图 10 种群分布密度

3.2 多工位点路径优化算法仿真实验

为检验改进算法的可行性和有效性，在 3 种不同工位点数下分别与原算法进行对比。同时为了避

免随机性，每次实验进行 10 次，取其平均值。在不同工位点数下的平均收敛速度及运行时间如图 11 和图 12 所示。当工位点数为 10 时，改进后遗传算法的收敛速度提高了 46.15%，程序运行时间缩短了 25.80%，而且随着工位点数量的增多，改进后的算法在运行时间和收敛速度方面的优势也得到了进一步提高。

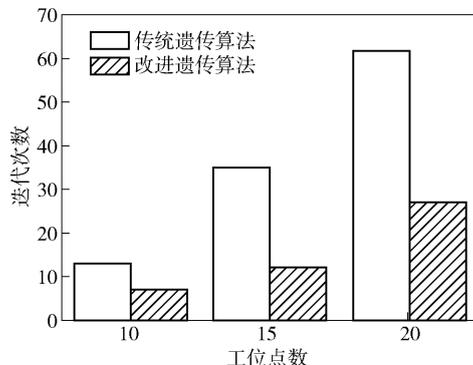


图 11 收敛速度对比

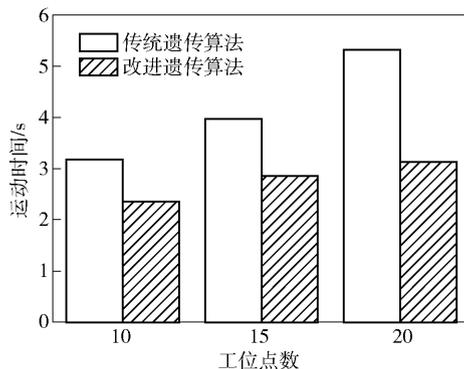


图 12 运行时间对比

多工位点的初始路径长度为 29.1507 m，如图 13 所示。运用改进遗传算法和传统遗传算法后，都可以得到长度为 15.7435 m 的优化路径，路径缩短了 45.99%。

4 结束语

对移动机械臂在任务空间内完成多工位点上多目标的抓取分拣过程建立数学模型，提出一种多目标抓取顺序优化的方法，确定选取最优工位点坐标的目标函数，通过运用改进的遗传算法求得最优工位点坐标，从而缩短移动机械臂的抓取路径长度。

对移动机械臂任务空间内的多个工位点建立 TSP 模型，改进的遗传算法与传统遗传算法相比，在

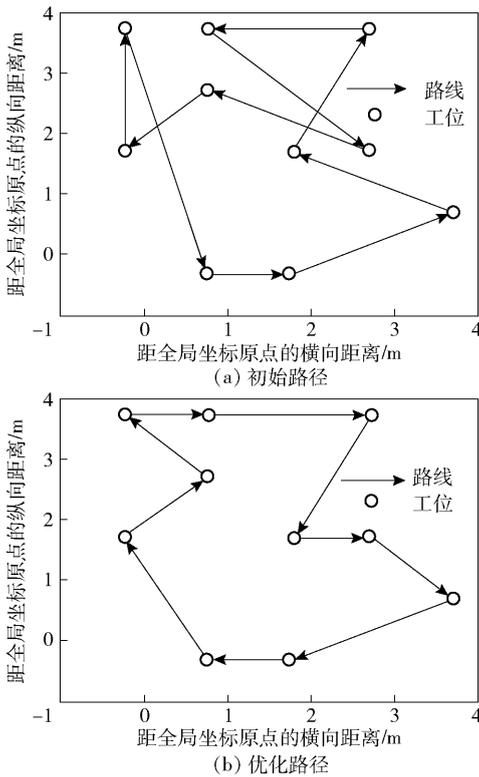


图13 初始路径与优化路径比较

运行时间和收敛速度等性能上都有显著提高. 该算法具有较高的准确性和稳定性, 适合工程实际应用.

参考文献:

- [1] Li Yue, Liu Lei. Investigation into ergonomics in logistics sorting equipment[C]//2019 IEEE International Conference on Computation, Communication and Engineering (ICCCE). Longyan: IEEE Press, 2019: 67-169.
- [2] Thakar S, Fang Liwei, Shah B, et al. Towards time-optimal trajectory planning for pick-and-transport operation with a mobile manipulator[C]//2018 IEEE 14th International Conference on Automation Science and Engineering (CASE). Munich: IEEE Press, 2018: 981-987.
- [3] Xu Jingren, Harada K, Wan Weiwei, et al. Planning an efficient and robust base sequence for a mobile manipulator performing multiple pick-and-place tasks [EB/OL]. New York: Cornell, 2020 (2020-01-22) [2020-08-19]. <https://arxiv.org/abs/2001.08042>.
- [4] Silva G, Costa P, Rocha L, et al. Path planning optimization for a mobile manipulator [C] // AIP Conference Proceedings. Rhodes: AIP Press, 2019: 220004-1-220004-4.
- [5] Vafadar S, Olabi A, Panahi MS. Optimal motion planning of mobile manipulators with minimum number of platform movements[C] //2018 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT). Lyon: IEEE Press, 2018: 262-267.
- [6] Ren Shunan, Yang X, Wang G, et al. Study on the stop position of the mobile manipulator for painting on big parts[C] // ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition (IMECE2015). Houston: ASME, 2015: 50907-50913.
- [7] Yan Lijun, Wei Junhu, Li Zongbin, et al. Optimization method based on ordinal genetic algorithm under the framework of nested partitions method[C] // IEEE 2008 7th World Congress on Intelligent Control and Automation. Chongqing: IEEE Press, 2008: 2259-2264.
- [8] 魏彤, 龙琛. 基于改进遗传算法的移动机器人路径规划[J]. 北京航空航天大学学报, 2020, 46 (4): 703-711.
Wei Tong, Long Chen. Path planning for mobile robot based on improved genetic algorithm[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2020, 46 (4): 703-711.
- [9] Jay S, Vinod Jain. An optimized algorithm for solving travelling salesman problem using greedy cross over operator [C] // IEEE 2016 3rd International Conference on Computing for Sustainable Global Development (INDIA-Com). New Delhi: IEEE Press, 2016: 2981-2984.