

基于结合搬运要素编码的遗传算法求解无人仓调度问题

陈宸

(华南师范大学 人工智能学院, 广东省佛山市 528000)

摘 要 仓库管理是对对仓库内货物的接收、存储、发货等一系列活动进行有效的管理控制, 传统的仓库的管理模式大多为人工管理模式, 存在分区混乱、运作效率低下等一系列问题。随电商兴起, 仓库的无人化管理成为发展方向, 而优化无人仓内搬运机器人的调度问题成为了提升管理效率的关键。在实际应用中, 在搬运机器人执行搬运工作的同时, 还需考虑拣选点位的负载与路线冲突导致的局部拥堵, 对仓库地图进行动态分区以提升运转效率。基于该场景下面临的问题, 本研究旨在设计一种优化算法, 在搬运机器人能够满足订单需求的前提下, 最小化总行走路径。研究的第一部分基于 Floyd 算法构建无人仓内各节点间距离矩阵, 设计了结合搬运要素编码和全局搜索的遗传算法, 在满足所有订单需求的前提下, 最小化了搬运机器人的行走距离。研究的第二部分基于第一部分中设计的遗传算法, 增加了关于拣选结点负载的约束, 实现了储位节点匹配对应拣选结点的动态分区, 均衡了单位时间内每个拣选工位的工作量。本研究中算法与思想为无人仓内搬运机器人的调度与分区管理问题提供了一种可行的解决方案, 并促进新型仓库管理方式的普及与应用。

关键词 遗传算法; 动态分区; 路径规划; 搬运机器人; 全局搜索

Solving the Scheduling Problem in Unmanned Warehouses Using a Genetic Algorithm Combined with Transport Element Coding

Chen Chen

(College of artificial intelligence, South China Normal University, Foshan 528225, China)

Abstract Warehouse management involves the effective control of activities such as receiving, storing, and shipping goods within a warehouse. Traditional warehouse management models are predominantly manual, leading to issues such as disorganized zones and low operational efficiency. With the rise of e-commerce, unmanned warehouse management has become a development direction, and optimizing the scheduling of transport robots in unmanned warehouses is key to improving management efficiency. In practical applications, while transport robots perform their tasks, it is also necessary to consider the load at picking points and local congestion caused by route conflicts, dynamically partitioning the warehouse map to enhance operational efficiency. This study aims to design

收稿日期: 年-月-日; 最终修改稿收到日期: 年-月-日 *投稿时不填写此项* 本课题得到……基金中文完整名称(No.项目号)、……基金中文完整名称(No.项目号)、……基金中文完整名称(No.项目号)资助.作者名1(通信作者), 性别, xxxx年生, 学位(或目前学历), 职称, 是/否计算机学会(CCF)会员(提供会员号), 主要研究领域为****、**** E-mail: ****.作者名2(通信作者), 性别, xxxx年生, 学位(或目前学历), 职称, 是/否计算机学会(CCF)会员(提供会员号), 主要研究领域为****、**** E-mail: ****.作者名3(通信作者), 性别, xxxx年生, 学位(或目前学历), 职称, 是/否计算机学会(CCF)会员(提供会员号), 主要研究领域为****、**** E-mail: **** (给出的电子邮件地址应不会因出国、毕业、更换工作单位等原因而变动。请给出所有作者的电子邮件)

第1作者手机号码(投稿时必须提供, 以便紧急联系, 发表时会删除): …… E-mail: ……*此部分6号宋体*

an optimization algorithm that minimizes the total walking path of transport robots while meeting order demands. The first part of the study constructs a distance matrix between nodes in the unmanned warehouse based on the Floyd algorithm and designs a genetic algorithm that combines transport element coding and global search to minimize the walking distance of transport robots while meeting all order demands. The second part of the study adds constraints on the load of picking nodes to the genetic algorithm designed in the first part, achieving dynamic partitioning of storage nodes to match corresponding picking nodes and balancing the workload of each picking station per unit time. The algorithms and ideas presented in this study provide a feasible solution to the scheduling and partition management problems of transport robots in unmanned warehouses, promoting the adoption and application of new warehouse management methods.

Key words Genetic Algorithm; Dynamic Partitioning; Path Planning; Transport Robots; Global Search

1 引言

仓库管理(也叫仓储管理)是对仓库内货物的接收、存储、发货等一系列活动进行有效的控制管理,维护仓库货物并确保日常经营活动正常进行。随人类生产生活需求的增加,传统的人工管理模式存在不少问题,特别是因为人力效率低下的因素导致的“爆仓”现象。随着技术的发展与电子商务的兴起,无人仓逐渐作为自动化仓储物流系统的发展方向和目标。

在无人仓的情境中,搬运机器人,即 Automated Guided Vehicle(AGV),通过特殊地标导航将物品运输至指定地点,是执行搬运货物任务的主要单元。执行搬运任务的过程,实际上未通过指令指派单个机器人去取一个货架至仓库内指定地点,如拣选工位,储存位,回收处等。

随市场需求的增加,搬运机器人的技术也在不断发展,早期包括 Amazon 的 Kiva 机器人,以及后来 AGV 搬运机器人、SHUTTLE 货架穿梭车、DELTA 分拣机器人等各式各样的、高度自动化的机器人都是为仓库的无人化量身定制的。搬运机器人本身运作性能存在差异,而如何对无人仓内搬运机器人进行调度,是无人仓管理的核心问题

为提高无人仓中搬运机器人的运作效率,制定较优的统筹调度策略是具有重要意义的。为实现出库效率的全局优化,节省人力,避免高峰期出现拣选点位负载过大现象,也需考虑拣选点位的实时负载。因此,制定一种合适的最优路径规划算法并对仓库进行分区具有重要意义。

2 相关工作

2.1 有关搬运机器人路径规划的研究

搬运机器人在执行搬运任务时,为节约时间以获取较高的工作效率,需要对其行走路径进行规划。在实际情况中,由于无人仓内机器人数目增加,会存在路径冲突的现象。因此,学术界不乏对机器人路径规划问题的研究。

José Ricardo Sánchez-Ibáñez 等人为自主移动机器人路径规划算法提供了清晰且全面的概述,特别是用于自主地面车辆的路径规划方法。该研究团队分析了不同的环境建模方法,如栅格地图、拓扑地图和混合地图,探讨了不同环境建模在不同路径规划算法下的表现。研究团队还考虑了机器人移动性和动力学对路径规划的影响,并分析了不同类型机器人的运动模型和动力学特性。通过对机器人移动性和动力学的研究,展示了路径规划算法在实际应用中的表现。[1]

Liwei Yang 等人将单机器人路径规划算法分为三类:经典算法、智能优化算法和人工智能算法,并讨论了图搜索算法、粒子群优化、神经网络算法等。研究团队还探讨了多机器人路径规划的不同方法,包括集中式规划和分布式规划,指出集中式规划强调解耦冲突,而分布式规划则优先考虑任务执行。[2]

Siwei Han 等人详细研究了三种路径规划算法,包括 A-Star 算法、单元分解和快速探索随机树(RRT)。其研究团队评估了 A-Star 算法在复杂空间中的表现,并验证了单元分解方法在几何地图上的准确性,同时在不同的场景中测试了 RRT 算法,

评估了其在高精度、高质量和合理计算成本场景中的表现。[3]

2.2 有关无人仓分区管理的研究

Pierre-William Albert 研究团队对仓库分配和布局设计的最新趋势和实际应用进行了综述。研究发现,当前的研究主要集中在同质环境中,而对异质和非标准环境的关注较少。论文指出,需要更多的研究来优化异质和非标准件环境的分配和布局设计。[4]

Lu Zhen 和 Haolin Li 有关智能仓库管理的论文重点探讨了空间高效布局和区块堆垛仓库的设计。其研究发现,智能仓库操作管理可以显著提高仓库的空间利用率和操作效率。[5]

3 无人仓场景说明

3.1 无人仓地图说明

无人仓内的设施,可以细分为 AGV 能行驶的道路节点,和别的功能节点(如工位,储位等)。这样,仓库地图模型可以抽象为这些节点构成的图,再按 AGV 能到达的节点来添加图的边。简单来说,附件仓库地图数据(map.csv)通过描述节点类型,以及节点之间的关系(边),可以构建如下图 1 所示的仓库地图

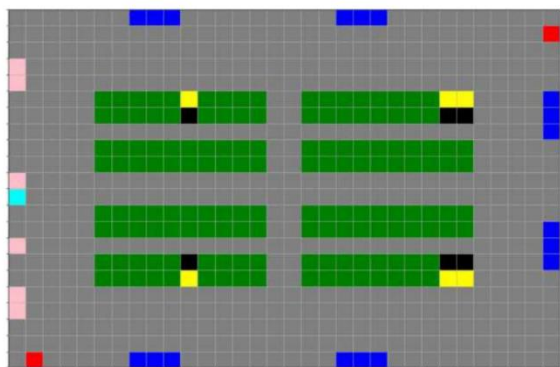


图 3-1 仓库地图

仓库地图数据(map.csv)是按 csv 格式存储,其节点类型有如下几类,在上图中用不同颜色标注。

- 1) 路径节点(灰色): AGV 可以自由通行。
- 2) 储位节点(绿色): 放置托盘或者普通货架, AGV 可以到达。一般只有一个位置可以进出,即靠近道路的位置。
- 3) 保留节点(黄色): 保留位置。

- 4) 柱子节点(黑色): 障碍物, AGV 不能到达。
- 5) 拣选工位节点(蓝色): 拣选机器人在这里把商品打包后从传送带出库,一般有多个托盘停靠位。
- 6) 补货位节点(粉色): 从高密度区补货的商品放置点,一般通过传送带输送。
- 7) 空托盘回收节点(红色): 空托盘回收处,图中只有两处。

3.2 无人仓任务场景说明

假设仓库地图按上述方式抽象成图,搬运机器人 AGV 一次只搬运一个托盘(带有多种商品),能执行从一个地图节点 n_a 移动到 n_b 的路径指令,其中每一步只能移动到有边相连的地图节点,不能斜着移动。

附件中机器人数据(agv.csv)里,给出了 20 个搬运机器人 AGV 在仓库地图上的初始位置坐标。假设仓库内商品都是中大件商品,每个在储位的托盘上叠放着多种商品,附件中的库存数据(pallets.csv)给出了全部托盘的位置以及托盘上放的商品信息。对于中件仓来说,即使用户订单包含了多个商品,实际发货还是一个商品一个包裹。这样,AGV 执行任务只需要尽快满足商品数目的要求,不需要等待同一订单中的全部商品到齐后才能出库。所以附件订单数据(orders.csv)里,每个订单只有同一件商品以及对应的数量。

无人仓流程是根据给定的一段时间内订单数据流,结合当前库存情况,统筹安排搬运机器人从储位搬运有需求商品的托盘到附近的拣选工位(即出库任务),拣选完成后需安排搬运工位处的非空托盘到空储位(即回库任务),或者安排搬运工位处的空托盘到托盘回收处(即回收任务)等。本文只考虑这三种主要任务场景,即出库、回库、回收任务。

4 遗传算法综述

4.1 基本遗传算法

遗传算法(Genetic Algorithm, GA)是一种模拟自然进化过程的优化算法。它通过对一组有优化目标的解(即个体)进行模拟的自然选择和交叉操作来逐步找到最优解。

遗传算法的概念提出可追溯到 19 世纪 50 年代,美国生物学家 Geoffrey H. Harrison 在研究自然选择理论时,首次提出了基于生物进化的优化算法的概

念。1971 年, 美国计算机科学家 Edward A. Feigenbaum 和 Michael J. D. Powell 在研究人工智能时, 首次提出了遗传算法的概念和基本思想。他们与美国计算机科学家 T.H. Holme 合作, 开发了遗传算法的基本框架。随计算机技术的发展, 遗传算法得到了不断优化, 在现代生活中得到了广泛的运用。

传统的遗传算法的执行过程示意如下:

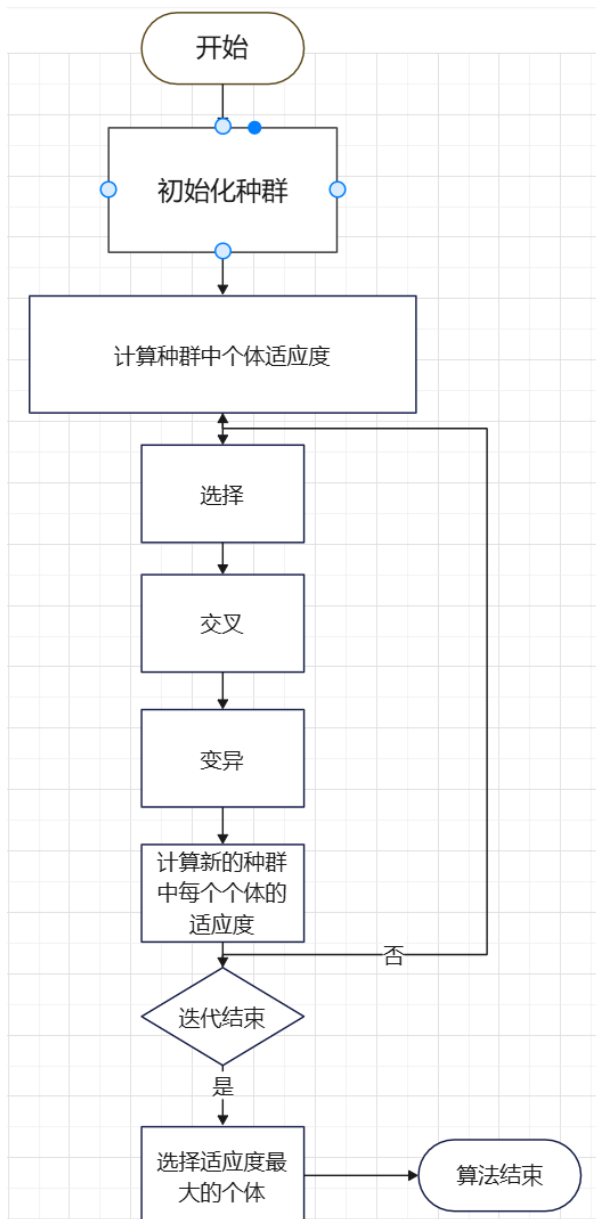


图 4-1 遗传算法迭代流程图

为实现搬运效率最高, 研究者确定总搬运距离为优化目标。考虑到实际优化问题存在多个目标, 情况众多, 并且需要结合搬运结点要素来构成路径, 需要采用全局搜索能力较强的优化算法求解此

类问题。考虑到遗传算法优秀的全局搜索能力且对初始条件与参数设置不敏感的特点, 并且遗传算法的种群进化过程可以并行处理, 具有较高的计算效率, 符合本题的大规模多目标优化的特点, 本文决定制定一种结合搬运要素的遗传算法求解该问题。

4.2 结合搬运要素的编码设计

因为所有储位结点都需被搬运, 且每个节点只能被一个机器人进行搬运, 需要将储位结点分配给所有可用的机器人, 此处设计基因编码的每个基因片段格式如下:

`agv_id : storage_label`

代表编号为 `storage_label` 的储位结点被编号为 `agv_id` 的机器人所搬运。

每个基因片段之间用“|”进行分隔, 故完整的一个个体的基因形式如下:

```

11:147|1:148|10:149|8:150|2:151|3:153|3:154|4:155|17
:156|15:159|6:160|5:161|9:162|7:163|14:164|6:165|15:
166|14:176|17:177|2:178|11:179|6:180|15:182|17:183|
12:184|12:185|6:188|5:189|2:190|14:191|1:192|4:193|3
:194|13:195|15:234|14:235|6:236|15:237|8:238|11:239|
0:240|16:241|10:242|9:243|14:246|3:247|10:248|5:249|
0:250|11:251|17:252|6:253|18:254|18:255|8:263|9:264|
15:265|15:266|2:267|7:268|18:269|15:270|8:271|17:27
2|10:275|0:276|11:277|6:278|18:279|4:280|9:281|9:282
|9:283|14:284|13:350|10:351|3:352|14:353|2:354|2:355
|9:356|12:357|18:358|1:359|12:362|16:363|6:364|10:36
5|5:366|3:367|1:368|16:369|16:370|2:371|8:379|13:380
|7:381|17:382|13:383|0:384|3:385|3:386|3:387|0:388|1
5:391|14:392|5:393|15:394|8:395|8:396|16:397|6:398|1
1:399|5:400|5:437|2:438|14:439|14:440|8:441|1:443|14
:444|16:445|13:446|1:449|4:450|7:451|5:452|8:453|5:4
54|11:455|17:456|1:466|1:467|3:468|2:469|15:470|11:4
72|4:473|0:474|10:475|15:478|7:479|9:480|6:481|4:482
|6:483|16:484|11:485
# type: "str"
  
```

5 问题求解

5.1 路径规划问题的求解

在本问题中, 我们需要制定 AGV 统筹调度的最佳策略, 假设先不考虑搬运机器人在执行任务时可能的碰撞问题, 请在无人仓 模型下设计调度算法, 根据附件中订单数据 (`orders.csv`), 和仓库内的

库存数据(pallets.csv),对于给定的 20 个搬运机器人(agv.csv),统筹调度和安排 AGV 任务,直到满足所有的订单需求,即全部拣选工位都空闲为止。这里,目标函数为在每个搬运机器人尽可能忙的同时,最小化全部搬运机器人的行走总路径。下面图中,用红色圆圈表示 AGV,用绿色方块表示货架或者托盘,用蓝色 X 表示拣选工位。右图中匹配了最近的 AGV、托盘和工位,使得指定 AGV 去取托盘后再送到工位拣选。

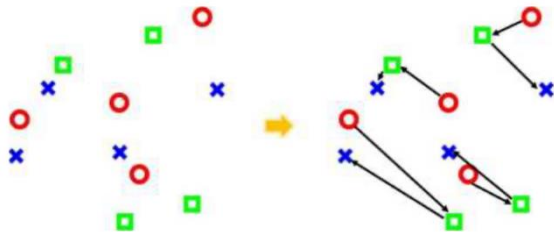


图 5-1 AGV 匹配调度示例图

5.1.1 数据预处理

研究者读取所给数据文件,剔除异常值。首先对 map.csv 中各节点坐标与相邻节点标签进行处理,构建邻接矩阵,对无人仓模型构成的栅格地图进行可视化,并绘制搬运机器人的可行路径。在实际处理中,坐标 x=25, y=6 的搬运机器人处于不可行结点,故在情境中只有 19 个机器人可用于搬运。无人仓模型可视化结果如下。

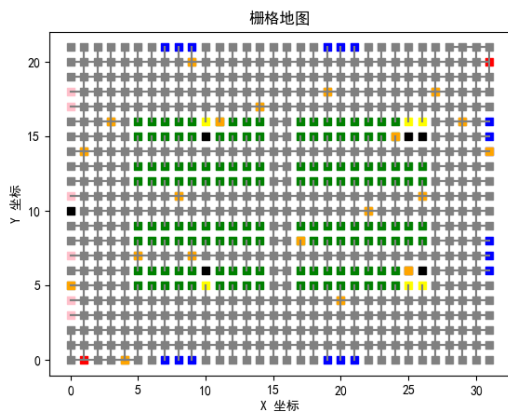


图 5-2 无人仓栅格地图

同时,根据所构建的邻接矩阵,利用 Floyd 算法计算每个节点间的最短距离,并构建距离矩阵。

	0	1	2	3	4	5	6	...	697	698	699	700	701	702	703
0	0.0	1.0	inf	inf	inf	inf	inf	...	inf	inf	inf	inf	inf	inf	inf
1	1.0	0.0	1.0	inf	inf	inf	inf	...	inf	inf	inf	inf	inf	inf	inf
2	inf	1.0	0.0	inf	inf	inf	inf	...	inf	inf	inf	inf	inf	inf	inf
3	inf	inf	inf	0.0	inf	inf	inf	...	inf	inf	inf	inf	inf	inf	inf
4	inf	inf	inf	inf	0.0	inf	inf	...	inf	inf	inf	inf	inf	inf	inf
...
699	inf	inf	inf	inf	inf	inf	inf	...	inf	inf	0.0	inf	inf	inf	inf
700	inf	inf	inf	inf	inf	inf	inf	...	inf	inf	inf	0.0	inf	inf	inf
701	inf	inf	inf	inf	inf	inf	inf	...	inf	inf	inf	inf	0.0	inf	inf
702	inf	inf	inf	inf	inf	inf	inf	...	inf	inf	inf	inf	inf	0.0	inf
703	inf	inf	inf	inf	inf	inf	inf	...	inf	inf	inf	inf	inf	inf	0.0

图 5: 无人仓结点邻接矩阵

	0	1	2	3	4	5	6	...	697	698	699	700	701	702	703
0	0.0	1.0	inf	inf	inf	inf	inf	...	inf	inf	inf	inf	inf	inf	inf
1	1.0	0.0	1.0	inf	inf	inf	inf	...	inf	inf	inf	inf	inf	inf	inf
2	inf	1.0	0.0	inf	inf	inf	inf	...	inf	inf	inf	inf	inf	inf	inf
3	inf	inf	inf	0.0	inf	inf	inf	...	inf	inf	inf	inf	inf	inf	inf
4	inf	inf	inf	inf	0.0	inf	inf	...	inf	inf	inf	inf	inf	inf	inf
...
699	inf	inf	inf	inf	inf	inf	inf	...	inf	inf	0.0	inf	inf	inf	inf
700	inf	inf	inf	inf	inf	inf	inf	...	inf	inf	inf	0.0	inf	inf	inf
701	inf	inf	inf	inf	inf	inf	inf	...	inf	inf	inf	inf	0.0	inf	inf
702	inf	inf	inf	inf	inf	inf	inf	...	inf	inf	inf	inf	inf	0.0	inf
703	inf	inf	inf	inf	inf	inf	inf	...	inf	inf	inf	inf	inf	inf	0.0

图 5-3 无人仓结点距离矩阵

5.1.2 搬运策略的制定与算法实现

接着根据读入的 order.csv 中的 pallet.csv 中的订单信息与托盘信息制定搬运策略,返回以货物 id 作为键,以两者货物量差为值的字典。

```
( '1085002', 4)
( '1286521', 31)
( '1308094', 52)
( '1751060', 31)
( '1766481', 54)
( '1842778', 14)
( '1867146', 34)
( '1897786', 15)
( '2247923', 14)
( '2302238', 27)
( '298104', 30)
( '582599', 33)
( '733141', 24)
( '901902', 24)
```

图 5-4 无人仓货物总量与订单货物总量差值

不难发现仓库中货物总量大于订单总量,故为省去将多余货物搬回原来储货位的距离与时间,只需让机器人将所有储货位上托盘全部搬运,即可满足所有订单要求。在实际情况中,拣选完毕后多余的货物可以统一运送至其他货仓作为补货。结合实际情况,研究者制定了如下的搬运策略。

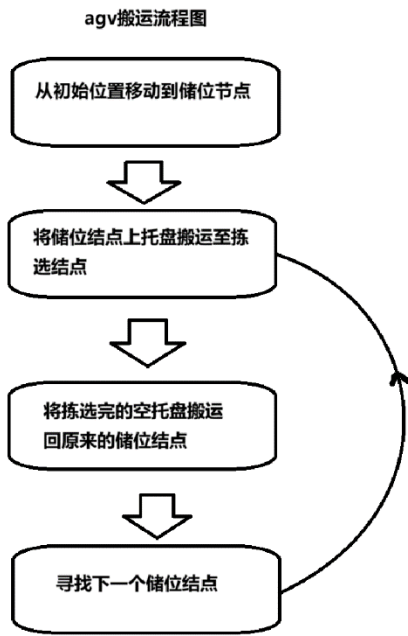


图 5-5 搬运机器人运作流程图

为实现全部机器人的行走总距离最小，个体适应度即设计为单个基因解析出来所有机器人所行走的总距离，对于单次搬运任务中的单个机器人编号为 i ，其行走距离为：

$$d_i = d_0 + 2d_1$$

d_0 为当前为所在位置到目标储位结点的最短距离。

d_1 为机器人所在储位结点到所有拣选结点距离的最小值。

机器人从拣选结点返回至当前储位结点视为一次搬运任务结束，根据基因序列执行下一次搬运任务，并对 d 进行累加。遍历整个基因序列后距离的总和即为该个体的适应度。

考虑到每个基因中各片段中 `stroage_id` 是按照一定的顺序排列的，只能对 `agv_id` 进行更改，即给不同的储位结点分配不同的机器人
在设定的交叉率下，采用单点交叉的方式，对个体的基因编码进行更改

```

Gene1  11:147|1:148|10:149|8:150|2:151|3:153|3:154|4:155|17:156
Gene2  12:147|11:148|9:149|2:150|4:151|2:153|1:154|10:155|6:156
  
```



```

交叉后
Gene1  11:147|1:148|10:149|8:150|2:151|2:153|1:154|10:155|6:156
Gene2  12:147|11:148|9:149|2:150|4:151|3:153|3:154|4:155|17:156
  
```

图 5-6 新型编码基因单点交叉示例

在设定的变异率下，采用 `random.shuffle()` 打乱 `agv_id` 的方式，对个体的基因编码进行更改。

例子：

Gene1

11:147|1:148|10:149|8:150|2:151|3:153|3:154|4:155|17:156

变异后

Gene1'

17:147|4:148|10:149|11:150|3:151|2:153|1:154|8:155|3:156

为产生新的种群，选择轮盘赌的方法。

5.1.3 问题一的解

在交叉率为 0.5，个体数为 80，迭代次数为 500 的条件下，适应度变化曲线如下。结果展示了全局最优以及单次迭代内的最优结果，所有机器人的最短总行走距离为 5159 个单位长度

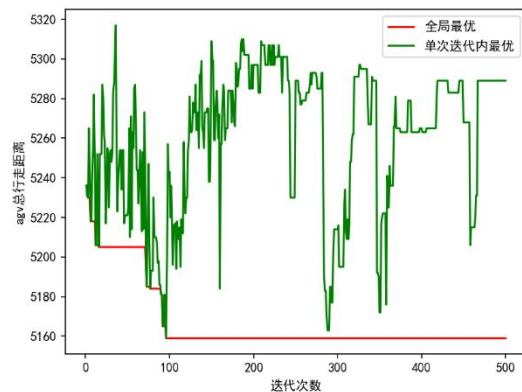


图 5-7 路径规划结果迭代图像

5.2 分区问题的求解

分区问题相较于路径规划问题增加了对于拣选点位负载量的约束，需要使每个拣选结点的负载量尽可能平均，由于每个托盘上货物量间存在差异，无法实现绝对的平均，因此将托盘货物总量关于拣选点位数目的平均值作为阈值。单个拣选机器人根据基因序列到达相应存储结点后，寻找最近且负载量小于设定的阈值的结点进行搬运，后更新该结点的负载量。

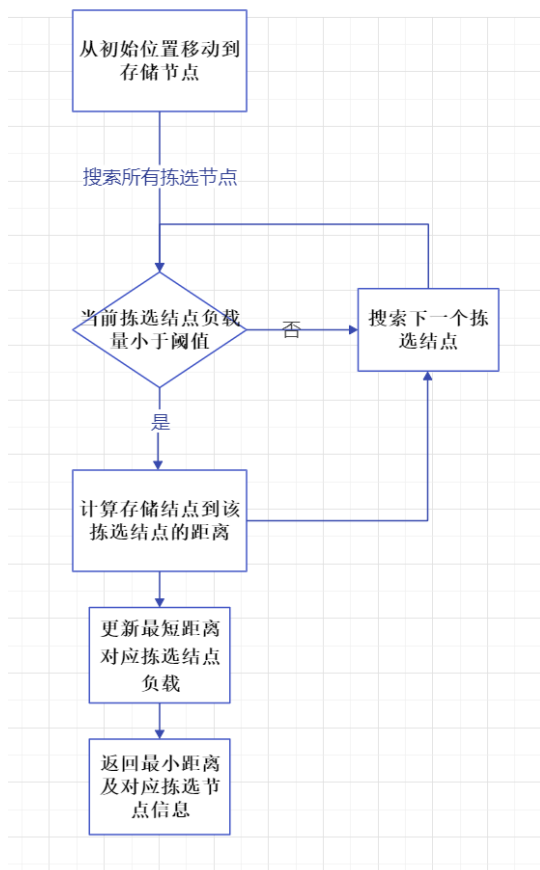


图 5-8 匹配拣选节点流程图

通过以上算法计算，得出每个拣选节点的负载量为：[479.502.404.481.592.421.490.486.476.504.517.484.482.541.496.481.526.503.]，满足负载量尽可能平均的要求。

动态分区结果如下，颜色相同的存储结点与拣选结点相对应

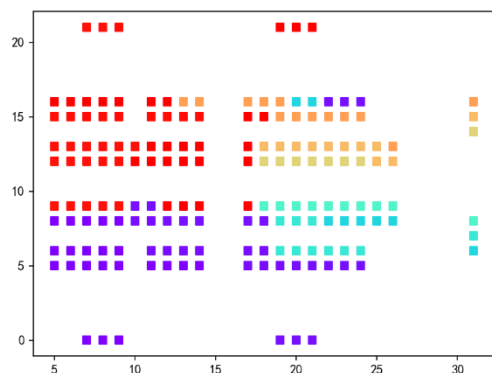


图 5-9 动态分区结果

在迭代次数为 500，种群个数为 80，交叉率为 0.5，变异率为 0.05 的条件下求解结果如下。

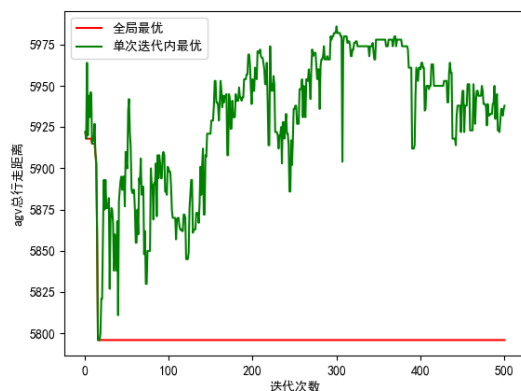


图 5-10 约束条件下迭代图像

求解的最短距离为 5796 个单位长度。

各位置的搬运机器人路径经过的结点标签如下。

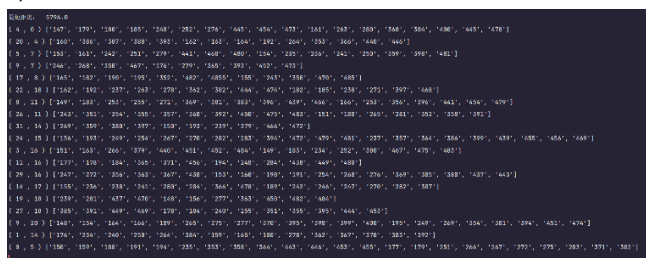


图 5-11 各机器人搬运路径结点标签

6 结语

本文设计了基于搬运要素的遗传算法求解了无人仓中的搬运机器人的搬运策略与路径规划问题，提高了搬运机器人的运作效率，并结合拣选点位负载对搬运选择进行约束，实现了存储点位对于拣选点位的分区问题，在实际生活中能使人工拣选点位稳定且高效运转。然而，本实验所设计的算法也存在性能上的不足，如收敛性较弱、执行时间较长等。在进一步的研究中，可以考虑对拣选点位进行搜索时剔除重复的距离计算以提高执行效率。还可以考虑搬运相应路程所需的时间，在不同时间段内拣选点位工作负载也相应会存在差异，在此情况下对仓库结点进行动态分区，能使实验结果更贴近于实际情况，进一步推进动态分区思想在实际生产中的应用以提高生产管理效率。

参 考 文 献

- [1] José Ricardo Sánchez-Ibáñez. Path Planning for Autonomous Mobile Robots, *Sensors* 2021, 21(23), 7898; <https://doi.org/10.3390/s21237898>
- [2] Liwei Yang, Ping Li, Song Qian He Quan and Erexidin Memetimin. Path Planning Technique for Mobile Robots, *Machines* 2023, 11(10), 980; <https://doi.org/10.3390/machines11100980>
- [3] Siwei Han, Hao Yu, Xuanshi Zhou. A comprehensive study of path planning algorithms for autonomous robots, *AIP Conf. Proc.* 3144, 030022 (2024) <https://doi.org/10.1063/5.0219735>
- [4] Pierre-William Albert, Mikael Rönnqvist, Nadia Lehoux . Trends and new practical applications for warehouse allocation and layout design: a literature review, *SN Applied Sciences*, Volume 5, article number 378, (2023)
- [5] Lu Zhen , Haolin Li. A literature review of smart warehouse operations management, *Springer*, Volume 9, pages 31–55, (2022)