



Fig.5 Comparison chart of total time-consuming of outbound tasks

图 5 出库总耗时对比图

在以上实验数据分析的基础上,本文进一步计算了 3 种算法在所有批次中出库任务总耗时方面的最优值、平均值和方差(见表 2)。从计算结果可以看出:综合所有批次的实验数据,协同优化算法的耗时最优值低于遗传算法 1.5%,低于贪心算法 11.9%;在平均值方面,协同优化算法耗时低于遗传算法 18.8%,低于贪心算法 28.7%;此外,分析方差数据可以看出,协同优化算法的稳定性远远高于其他算法。因此,同其他两种算法相比,本文提出的协同优化算法在有效性和稳定性方面具有显著优势。

Table 2 Data analysis of the effectiveness and stability of proposed algorithm

表 2 算法有效性和稳定性数据分析表

	最优值	平均值	方差
协同优化算法	74.54	84.559 29	40.569 31
遗传算法	75.41	104.140 7	332.301 9
贪心算法	84.67	118.626 4	420.352

b) 特征场景实验结果及分析

特征场景实验分析,旨在验证智能仓储协同优化算法在不同场景下的表现情况。按照仓储货物可能出现的特点,我们从所有出货批次中筛选出包含该特点的出货批次,分成下列 3 个场景再进行算法间的对比分析。

- 场景 1:货品间相似度高、出货频率高的货品需求任务单;
- 场景 2:货品间相似度高、出货频率低的货品需求任务单;
- 场景 3:货品间相似度高、出货频率高的货品需求任务单。

在实验中,我们分别对货位路径协同优化算法、传统遗传算法、贪心算法在特定场景下的路径规划算法耗时、AGV 运行时间、AGV 转弯次数、冲突等待时间、完成出货任务所需 AGV 数量、综合耗时进行了计算。下面分别对 3 个场景的实验结果进行分析。

场景 1 的高相似度、高出货频率的货品集中出货是一般仓储常规的出货情况,一般而言,发生这种情况时也会伴随出货数量大这一特点,出货量更大能够考验算法的优化效果。这种常规情景下的算法优化效果也是最值得注意和研究的。表 3 描述了在该场景下,3 种算法的具体表现情况。从路径规划的时间消耗比较上来看:协同优化算法任务路径规划时间消耗最短,贪心算法任务路径规划时间消耗最长;从优化结果上分析,三者优化结果运行时间相近,货位路径协同优化算法和传统货架优化算法为 31 个单位时间,转弯次数均为 2 次,贪心算法为 30 个单位时间。但是除了货位路径协同优化算法外,其他两个算法均存在 AGV 运行时存在冲突。从综合用时来看,货位路径协同优化算法的表现更为出众一些,也符合预期的估计,没有造成车辆冲突的情况。因此,从货品出库效率的角度讲,协同优化算法优于其他两算法。

Table 3 Experimental data of Scenario 1**表 3** 场景 1 实验结果汇总表

	路径规划时间消耗(s)	运行时间(单位时间)	转弯次数(次)	冲突次数(次)	动用车辆数(辆)	综合用时(s)
协同优化算法	11.58	31	2	0	3	77.58
遗传算法	35.67	31	2	2	3	109.67
贪心算法	64.58	30	2	4	4	144.58

场景 2 中,货品的主要特征为货品间相似度高、出货频率低,即高相似度、低出货频率的货品集中出货的场景,其主要应用于突发性缺少某些货物而进行的少量货物出库的情况.在该场景下,3 种算法的表现情况见表 4.具体来说,从路径规划时间上分析,货位路径协同优化算法表现最好,遗传算法其次,贪心算法较弱.其原因在于:贪心算法的关注点为出入库频率,不涉及相关性问题,在高相关货品出库时,货品分散在其他货架,导致其更有可能需要规划更多的货架进行出库,更多出库车辆数带来的是更高的车辆部署成本以及更久的路径规划时间.从 AGV 路径冲突分析,货位路径协同优化算法依然有效地避免了 AGV 冲突.同时,与场景 1 相比,在该场景下,传统遗传算法和贪心算法的冲突次数都有所降低.其原因是:在这两种算法所计算的货架位置中,低频率货品安排位置一般孤立,出库时不会总是占用主要出库道路,因此相对冲突发生的机会变小.而货位路径协同优化算法则是在高频率货品放在优质出库位和集中出库时防止碰撞之间做平衡,在处理低频率货物时更可能将其和高频率货物穿插放置,其优点在于低频出货时也可能使其更近,缺点在于有些高频货物无法放在最佳出库位置上.从整体优化效果来看,尽管协同优化算法仍旧比其他算法优化效果更好,但优势不如场景 1 中明显.

Table 4 Experimental data of Scenario 2**表 4** 场景 2 实验结果汇总表

	路径规划时间消耗(s)	运行时间(单位时间)	转弯次数(次)	冲突次数(次)	动用车辆数(辆)	综合用时(s)
协同优化算法	16.31	35	4	0	2	94.31
遗传算法	37.65	35	3	1	2	117.65
贪心算法	38.95	39	4	0	4	124.95

场景 3 中,货品的主要特征为货品间相似度高、但货品本身历史出货频率高.该场景主要发生于零散货品补货,一般货品出货量较小,AGV 路径冲突问题相对不严重.在该场景下,3 种算法的表现情况见表 5.从实验结果可以看出:在该场景下,协同优化算法的综合表现稍弱于传统遗传算法.其原因在于:协同优化算法关注货品间的相似度的适应性函数在设计之初就是为了应对集中出货导致 AGV 出货路径规划冲突严重这个问题,其更为关注货品间的相似度;而传统遗传算法正好相反,它更为关注货品的出货频率.因此,对于以货品低相似度、高频率为特征的场景 3 中,AGV 冲突处理能力不再成为决定算法表现的核心因素,协同优化算法不具优势.

Table 5 Experimental data of Scenario 3**表 5** 场景 3 实验结果汇总表

算法	路径规划时间消耗(s)	运行时间(单位时间)	转弯次数(次)	冲突次数(次)	动用车辆数(辆)	综合用时(s)
协同优化算法	16.79	35	4	0	3	94.79
遗传算法	18.43	31	3	1	3	90.43
贪心算法	67.84	27	4	2	3	137.84

综上所述,我们在综合场景和特定特征场景下各算法的表现情况均进行了相关实验及结果分析.实验结果表明:从出库效率的角度来看,在不同特定特征场景下,货位路径协同优化算法的表现有所差异,在高相似度、高出货频率的特征场景中最具优势.在综合场景下,货位路径协同优化算法的表现明显优于其他算法.因此,在实际的智能仓储系统中,本文所提出的货位路径协同优化算法可有效提高仓储的出库率.

4 总结与展望

智能仓储的优化是目前整个未来仓储发展的重要方向之一.本文根据实际问题需求,参考协同优化思想,提出了智能仓储货位路径协同优化的数学模型和相关求解算法,包括货品相似度求解算法和改进适应度函数的

路径规划算法;并在以上两种算法的基础上,基于货位路径协同优化思想实现了货位路径协同优化.同时,基于真实仓储运维数据,本文从不同的维度、场景分别对货位路径协同优化算法的表现情况进行实验并分析,实验结果表明,本文提出的智能仓储协同优化算法在算法有效性和稳定性上具有显著优势.该算法可有效提高仓储的出货效率,降低运输成本.

在后续工作中,我们将在以下方面继续展开研究:(1) 本文所提出的解决方案主要针对于网格格式 AGV 布局,在其他布局下能否适用有待进一步考察和验证;(2) 将货品的相关性、体积、质量均引入货位路径协同优化算法中,以此保证货架的稳定性和放置货品的效率,扩大本文所提出的货位路径协同优化算法的适用条件,使其可以扩展至更多的应用场景;(3) 考虑当 AGV 小车数量不充足时,即待执行的出货任务数多余可支配的 AGV 数量时,智能仓储协同优化算法的研究.

References:

- [1] Ding L,Zhang Y,Yin SC. Discussion on the development status and trends of my country's logistics and storage industry. Hoisting and Conveying Machinery, 2018(4):69-71 (in Chinese).
- [2] Xu CX. Smart warehousing solutions from "people looking for goods" to "goods looking for people". China Strategic Emerging Industry, 2018(21):36-37 (in Chinese).
- [3] Wu JP. Application analysis and prospects of Kiva robot in Amazon warehouse. Logistics & Material Handling, 2015,20(10): 159-164 (in Chinese).
- [4] Wang XC. Talking about the "goods to people" technology of robots in warehouse management——based on the KIVA orange robot of Amazon logistics center. Modern Economic Information,2017(13):78,80 (in Chinese).
- [5] Sun C, Liang Q, Wang ST. Investigation and research on JD warehouse intelligent system——Taking Shanghai "Asia One" warehouse as an example. China Logistics & Purchasing, 2017(18):70-71 (in Chinese).
- [6] Cai J, Kuang X, Song S, *et al.* Automated warehouse storage assignment policy based on storage frequency and workload balance. In: Proc. of the Int'l Conf. on Logistics, Informatics and Service Sciences. IEEE, 2017. 1-6.
- [7] Wang WL, Gao J, Gao TY, Zhao HT. Optimization of automated warehouse location based on genetic algorithm. In: Proc. of the Int'l Conf. on Control, Automation and Artificial Intelligence. 2017.
- [8] Liu F, Shi Z, Liu Y. Location assignment algorithm for AS/RS based on fuzzy mathematics. Journal of University of Shanghai for Science and Technology, 2011,33(1):71-74 (in Chinese with English abstract).
- [9] Yang W, Zhang WY, Chang YB, Qiu XH, Wang W. Optimization of location assignment in AS/RS. Modern Manufacturing Engineering, 2014,12:134-140 (in Chinese with English abstract).
- [10] Tinelli LM, Becker M. Intelligent warehouse product position optimization by applying a multi-criteria tool. In: Proc. of the Robotics in Smart Manufacturing. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2013. 137-145.
- [11] Arnaut JP. Worm optimization for the multiple level warehouse layout problem. Annals of Operations Research, 2017,4:1-23.
- [12] Cserevák Á. Further development of an AGV control system. In: Proc. of the Vehicle and Automotive Engineering 2. Cham: Springer-Verlag, 2018.
- [13] Zhang B, Li LW, Zhao YH, *et al.* The research on E-commerce logistics picking AGV path optimization method based on the improved A* algorithm. In: Proc. of the Int'l Conf. on Cybernetics, Robotics and Control. IEEE, 2017. 99-103.
- [14] Jiang K, Sun HY, He QC. Research on AGV scheduling strategy assembly workshop considering with distributing area layout. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2013,10:141-144 (in Chinese with English abstract).
- [15] Zhang SY, Yang YS, Liang CJ, Xu BW, Li JJ. Optimal control of multiple AGV path conflict in automated terminals. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2017, 17(2):83-89 (in Chinese with English abstract).
- [16] Bilge Ü, Ulusoy G. A time window approach to simultaneous scheduling of machines and material handling system in an FMS. Operations Research, 2017,43(6):1058-1070.
- [17] Mousavi M, Yap HJ, Musa SN,Tahiri F, Dawal SZM. Multi-Objective AGV scheduling in an FMS using a hybrid of genetic algorithm and particle swarm optimization. Plos One, 2017,12(3):e0169817.
- [18] Hillis WD. Co-Evolving parasites improve simulated evolution as an optimization procedure. Physica D, 1990,42(1-3):228-234.
- [19] Shi Y, Teng H, Li Z. Cooperative co-evolutionary differential evolution for function optimization. In: Proc. of the Int'l Conf. on Natural Computation. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2005.
- [20] Wang, YS, Teng HF, Shi YJ. Cooperative co-evolutionary scatter search for satellite module layout design. Engineering Computations, 2009,26(7):761-785.
- [21] Huo JZ, Teng HF, Sun W, *et al.* Human-Computer co-operative co-evolutionary method and its application to a satellite module layout design problem. The Aeronautical Journal, 2010,114(1154):209-223.

- [22] Liang J, Liu R, Yu KJ, Qu BY. Dynamic multi-swarm particle swarm optimization with cooperative coevolution for large scale global optimization. Ruan Jian Xue Bao/Journal of Software, 2018,29(9):2595-2605 (in Chinese with English abstract). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/29/2595.htm> [doi: 10.13328/j.cnki.jos.005398]
- [23] Lu PH. Design and implementation of intelligent warehousing collaborative optimization algorithms [MS Thesis]. Xi'an: Xidian University, 2019 (in Chinese).
- [24] Zhang YH, Qiu JD, Tang MA. Slotting optimization for the automated stereoscopic warehouse by shelf shared mode. Computer Applications and Software, 2017,34(07):262-266+272 (in Chinese with English abstract).
- [25] Liu ZS, Tong LY, Wei LP, Zhu K, Qian XL. A slotting optimization model based on greedy algorithm. Logistics Sci-Tech, 2013,36(9):99-101 (in Chinese with English abstract).

附中中文参考文献:

- [1] 丁力,张玉,尹世琛.我国物流仓储行业发展现状与趋势探讨.起重运输机械,2018,(4):69-71.
- [2] 徐晨曦.智能仓储的解决方案——从“人找货”到“货找人”.中国战略新兴产业,2018,21:36-37.
- [3] 吴菁芄.亚马逊仓库 Kiva 机器人的应用分析与前景展望.物流技术与应用,2015,20(10):159-164.
- [4] 王晓春.机器人在仓储管理中的“货到人”技术浅谈——基于亚马逊物流中心 KIVA 橙色机器人.现代经济信息,2017(13):78,80.
- [5] 孙璨,梁沁,王妹婷.京东仓储智能化体系调查研究——以上海“亚洲一号”仓库为例.中国物流与采购,2017(18):70-71.
- [8] 刘峰,施展,刘莹.自动化立体仓库的货位分配模糊算法研究.上海理工大学学报,2011,33(1):71-74.
- [9] 杨玮,张文燕,常晏彬,邱小红,王雯.自动化立体仓库的货位分配优化.现代制造工程,2014,12:134-140.
- [14] 姜康,孙海燕,何其昌.综合配料区布局的总装车间 AGV 系统调度研究.组合机床与自动化加工技术,2013,10:141-144.
- [15] 张素云,杨勇生,梁承姬,许波桅,李军军.自动化码头多 AGV 路径冲突的优化控制研究.交通运输系统工程与信息,2017,17(2):83-89.
- [22] 梁静,刘睿,于坤杰,瞿博阳.求解大规模问题协同进化动态粒子群优化算法.软件学报,2018,29(9):2595-2605. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/29/2595.htm>
- [23] 陆鹏浩.智能仓储协同优化算法的设计与实现[硕士学位论文].西安:西安电子科技大学,2019.
- [24] 张衍会,邱建东,汤旻安.一种货架共用模式自动化立体仓库货位优化.计算机应用与软件,2017,34(07):262-266+272.
- [25] 刘志帅,全凌云,魏利鹏,朱凯,茜晓亮.基于贪婪算法的货位优化模型.物流科技,2013,36(9):99-101.



蔺一帅(1987-),女,博士,讲师,CCF 专业会员,主要研究领域为面向 Agent 的软件工程,智能系统软件.



孙雨楠(1996-),男,硕士生,主要研究领域为智能仓储协同优化.



李青山(1973-),男,博士,教授,博士生导师,CCF 高级会员,主要研究领域为软件自适应,软件演化,面向 Agent 的软件工程.



王亮(1976-),男,硕士,工程师,主要研究领域为智能工厂,智能仓储物流,智能园区行业领域的新一代信息技术.



陆鹏浩(1994-),男,硕士,主要研究领域为分布计算,可信计算与信息安全.



王颖芝(1996-),女,硕士生,主要研究领域为智能小车存取系统优化.