

基于改进K-均值算法的零部件拣选聚类模型

周到,董宝力

(浙江理工大学机械工程学院,浙江杭州310018)

摘要:针对零部件多种少量拣选问题,在多人协同拣选模式下,任务分配不合理、拣选时长相差大,拣选环节易超时,构建以最短拣选时长为目标的多人协同拣选模型,并用改进K-均值算法及遗传算法对模型进行求解。针对传统K-均值算法聚类结果各簇所包含拣选点数量相差巨大的缺点,采用各簇拣选时间为指标,对拣选点所归属簇变换,并利用遗传算法对聚类结果进行路径规划、拣选时长计算,得到最优聚类结果。以某安防设备生产企业的零部件拣选环节为研究对象,与简单分批得到的拣选时间进行对比,验证了该算法的有效性。

关键词:任务分配;K-均值算法;遗传算法;路径规划

DOI:10.11907/rjtk.231610

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



中图分类号:TP311.13

文献标识码:A

文章编号:1672-7800(2024)009-0131-06

Components and Parts Picking Cluster Model Based on Improved K-means Algorithm

ZHOU Dao, DONG Baoli

(Faculty of Mechanical Engineering & Automation, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: Aiming at a variety of small picking problems of parts, in the multi-person collaborative picking mode, the task allocation is unreasonable, the picking time varies greatly, and the picking link is easy to timeout. A multi-person collaborative picking model aiming at the shortest picking time is constructed, and the improved K-means algorithm and genetic algorithm are used to solve the model. Aiming at the shortcomings of the traditional K-means algorithm clustering results, the number of picking points contained in each cluster varies greatly. The picking time of each cluster is used as an index to transform the cluster where the picking points belong. The genetic algorithm is used to perform path planning and picking time calculation on the clustering results to obtain the optimal clustering results. Taking the parts picking process of a security equipment manufacturing enterprise as the research object, the effectiveness of the algorithm is verified by comparing with the picking time obtained by simple batching.

Key Words: task allocation; K-means algorithm; genetic algorithm; path planning

0 引言

企业零部件拣选作业是根据生产计划要求从仓库中拣选出所需零部件,再集中送至加工工位和组装产线,实现成品制造。对于多种少量的零部件拣选,其存在拣选点数量多、零部件形状多样等问题,非统一包装不适合料箱机器人作业。适合人到货拣选模式,多人协同作业可减少其拣选时间。在零部件拣选任务分配问题上,选择合理任

务分配方法对缩短总拣选时长具有重要意义。

多人任务分配问题属于NP难题。Bai等^[1]分析了多种聚类算法,并提出将聚类策略与目标插入度量相结合的形式,保证了访问所有目标位置的总旅行时间在一个合理的可计算上界内。Pendharkar等^[2]针对具有约束的任务分配问题,采用改进蚁群算法求解最优方案。李富强^[3]基于K-均值算法思想,将多机器人分配到各任务区中,每个任务区由多个机器人共同完成任务,减少任务分配时间。黄胤^[4]为了避免拍卖算法在平局时随机分配任务的情况,利

收稿日期:2023-06-10

基金项目:浙江省自然科学基金项目(LY16F020024);教育部产学研合作协同育人项目(220902084031751)

作者简介:周到(1997-),男,浙江理工大学机械工程学院硕士研究生,研究方向为智能制造;董宝力(1974-),男,博士,浙江理工大学机械工程学院副教授,研究方向为制造业信息化与智能制造。本文通讯作者:董宝力。

用拍卖算法在任务分配阶段加入了距离判断公式,提高了系统的整体收益。Zhang等^[5]利用改进的粒子群算法,考虑多目标的任务分配场景,有效地提高分配效率。邵泽熠^[6]对传统K-均值算法采用密度和最小距离综合最优指标确定多个初始聚类中心,进行订单分批优化。胡小建等^[7]针对物流企业的订单分批问题,提出改进Canopy-k-means算法以有效提高分拣效率并降低分拣批次。李珍萍等^[8]围绕无人仓库拣选问题,基于影响订单拣选成本和效率两种因素设计拣选成本最小的整数规划模型,并设计K-max聚类算法进行求解。利用启发式算法对订单进行分批也有一定应用,例如马廷伟等^[9]对二进制粒子群算法进行改进,改善了人工拣选的工作效率。王旭坪等^[10]构建考虑订单完成期的订单分批混合整数规划模型,采用改进的固定时间窗订单分批启发式规则进行求解。Tsai等^[11]构建多重遗传算法以最小化运输成本与提前期和延期惩罚之和以寻找最优的批量拣货计划。王姗姗等^[12]以料箱总出库次数最小为优化目标,设计混合交叉策略的遗传算法对订单分批优化模型进行求解。吴仁超等^[13]以最小化订单拣选批次路径时长为目标,提出混合元启发式算法。秦馨等^[14]对“货到人”模式下的订单分批问题,以最小化货物搬运次数为目标构造聚类模型,通过数据规模分析对比说明提出的分批策略优于先到先分批策略与不分批策略。在路径规划方面,例如李龙澍等^[15]针对蚁群算法提出利用方向指导信息优化初始信息素的分布情况,以改善算法收敛过慢的缺点。Gao等^[16]采用混合多目标进化算法求解混合制造系统中的物料配送路径问题,有效减少总行驶距离。杨倩等^[17]设计改进的粒子群算法,解决了含多种物料搬运设备的物料配送问题,将案例与自适应粒子群算法进行对比,结果表明改进粒子群算法的解优于自适应粒子群。

上述研究中,在拣选点较少情况下,使用启发式算法解决分配任务内容可以达到总拣选距离最短、拣选时长最短等目的。但在拣选点数量过大的情况下,解空间过大,使用启发式算法求解会存在计算时间长,且找不到满意解的情况。而单使用常规聚类算法分配任务,存在初始聚类中心不好控制且聚类结果拣选点数量相差较大的情况,会导致任务分配不均衡且相对完成时长差距较大。相较于其他聚类算法,K均值算法可控制聚类的簇数目,且具有收敛速度快、聚类效果较优及良好的可扩展性,因而在实践中得以广泛应用。本文以某安防设备制造企业仓库零部件拣选环节为研究对象,构建了以均匀分配任务缩小总拣选时长为目标的任务分配拣选模型。该模型通过改进K-均值算法对拣选点进行聚类,利用遗传算法对每簇的拣选时长进行计算。并以拣选时长为衡量标准增加拣选点所属簇变换的操作,通过多次迭代得到最优聚类结果。本文拣选点所属簇变化的操作,为零部件拣选任务分配提供了一种新思路。

1 问题描述

本文针对某安防设备制造企业仓库的零部件拣选任务分配环节进行研究。多人协同拣选情况下,零部件拣选完成时长取决于耗费时间最长的拣货人员。在拣选零部件环节,以往是人通过口头商量等形式分配任务,导致分工不均,工作量相差较大,从而影响总拣选时长。本文利用聚类算法将人对应任务拣选点进行拣选工作。

根据生产计划,仓库在时间窗内到达订单首先根据配送时间进行分批。分批后对配送时间最紧急的一批进行任务分配并且拣选。拣选模式为“人到货”拣选模式,仓库拣选拣货人员从I/O点出发依次至任务单上指定位置将零部件搬运至物料小车上,最后回到I/O点。

在 T 时间窗内产生 N 个配送订单,每个订单配送时间不定,每个订单包含若干种零部件需要拣选,每种零部件所需数量不定,每种零部件货箱体积、质量不定,并带有所在货架信息(为了直观表达本文将货架编码表达为坐标信息)。为了按送达时间要求,对这 N 个订单按配送时间进行分批,将要拣选的批次进行任务分配,分为 O_1, O_2, O_3, \dots ,分别分配给对应的拣货人员 R_1, R_2, R_3, \dots 。每个拣选任务中会包括零部件种类数目、单种零部件拣选箱数、零部件单箱重量、体积、坐标。如第 a 个任务 O_a 有 b 种零部件零件,第 b 种零部件零件需拣选数量为 q_b 箱。每种零部件零件单箱重量为 m_b ,单箱体积为 V_b ,货箱在仓库中的坐标为 (x_b, y_b, z_b) 。

根据物料小车的承载上限,分配的每个拣选任务单包含的所有零部件零件质量和不超过 M_{\max} ,每个拣选任务单的所有零部件体积总和不超过 V_{\max} 。本文在任务分配中将拣选点进行合理分配,目的在于缩短不同零部件拣选任务之间的完成时长,减少总拣选时长。

2 模型建立

在订单根据配送时间进行分批后,在某批待拣选的任务中包含 n 个拣选点,其集合为 $P = \{1, 2, 3, \dots, n\}$,每个拣选点对应的零部件其体积集合为 $V = \{V_1, V_2, V_3, \dots, V_n\}$,对应的质量集合为 $m = \{m_1, m_2, m_3, \dots, m_n\}$ 。拣货人员需从I/O点出发完成各自拣选任务再回到I/O点,I/O点记为拣选点 $\{0\}$, C 为拣选点与I/O点的集合 $C = \{0\} \cup P$ 。空闲状态的拣货人员有 m 人,其集合为 $R = \{1, 2, 3, \dots, m\}$ 。需将拣选任务分为 m 份,分配给对应拣货人员,其拣选任务集合为 $O = \{O_1, O_2, O_3, \dots, O_m\}$ 。

优化目标为最小化拣选任务时间。在多人协同拣选模式中,拣选完成时间取决于耗费时间最长的拣货人员^[18],拣货人员完成拣选任务的时间集合为 $t = \{t_1, t_2, t_3, \dots, t_m\}$, t_m 表示第 m 位拣货人员的任务完成时长。

目标函数形式如下:

$$\min Z = \max \{t_1, t_2, t_3, \dots, t_m\} \quad (1)$$

其中,每位拣货人员完成任务时长由两部分组成,第一部分是路程消耗时间,第二部分是拣货时间。拣货时间由基本拣选时间 t_0 (由确认位置、确认编号、任务单勾选等时间组成)及货架高度乘以系数 λ 组成,每层货架拿取时间并不相同,可用 $\lambda y_{ir} z_i$ 表示不同层货物的抓取消耗时间。任务完成时间如下:

$$t_r = \left(\sum_{i \in C} \sum_{j \in C} d_{ij} x_{ij} / v \right) + \sum_{i \in P} (t_0 + \lambda y_{ir} z_i) \quad (2)$$

其中, d_{ij} 为拣选点*i*与拣选点*j*之间的路程。根据仓库布局可知,计算两拣选点之间的路程有3种情况^[19]。如图1所示巷道宽度为2 m,一组货架长度为4 m,宽度为2 m。

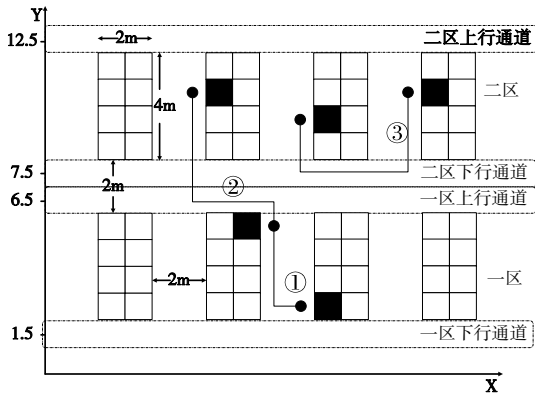


Fig. 1 Warehouse local picking distance calculation
图1 仓库局部拣货路程计算

(1) 两拣货点在同一巷道内时,

$$d_{ij} = |x_i - x_j| + |y_i - y_j|。$$

(2) 两拣货点在不同巷道不同区时,

$$d_{ij} = |x_i - x_j| + |y_i - y_j|。$$

(3) 两拣货点在同区不同巷道时,拣货人员可以走所在区的上行通道或下行通道到达另一拣选点,在四区型仓库中分4种情况。

都在一区 $d_{ij} = \min(|x_i - x_j| + |y_i - 1.5| + |y_j - 1.5|, |x_i - x_j| + |6.5 - y_i| + |6.5 - y_j|)。$

都在二区 $d_{ij} = \min(|x_i - x_j| + |y_i - 7.5| + |y_j - 7.5|, |x_i - x_j| + |12.5 - y_i| + |12.5 - y_j|)。$

都在三区 $d_{ij} = \min(|x_i - x_j| + |y_i - 13.5| + |y_j - 13.5|, |x_i - x_j| + |18.5 - y_i| + |18.5 - y_j|)。$

都在四区 $d_{ij} = \min(|x_i - x_j| + |y_i - 19.5| + |y_j - 19.5|, |x_i - x_j| + |24.5 - y_i| + |24.5 - y_j|)。$

式(2)中, v 为拣货人员行走速度。其中, x_{ij} 与 y_{ir} 为决策变量,具体如下:

$$x_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{工作人员}r\text{从拣选点}i\text{行驶到拣选点}j; \\ 0, & \text{其他。} \end{cases}$$

其中, $i, j \in C, r \in R$

$$y_{ir} = \begin{cases} 1, & \text{拣选点}i\text{归为工作人员}r\text{拣选任务} \\ 0, & \text{其他} \end{cases}$$

其中, $i \in P, r \in R。$

由于物料小车的承载上限,其最大承重量为 M_{\max} ,最大容纳体积为 V_{\max} 。所分配任务中包含的零部件质量之和与体积之和不得超过小车属性上限。

$$\sum_{i \in P} y_{ir} \times V_i \leq V_{\max} \quad (3)$$

$$\sum_{i \in P} y_{ir} \times m_i \leq M_{\max} \quad (4)$$

为了确保此批次零部件被全部拣选,每个点位都要被拣选到但不重复拣选此点位。得到约束条件如下:

$$\sum_{r \in R} y_{ir} = 1, i \in P \quad (5)$$

3 算法设计

在仓库拣选中,常用K-均值算法根据货物空间坐标进行聚类,再进行任务分配,每簇即一个拣选任务。聚类操作过程中存在初始中心点随机分配缺点,多次聚类结果存在细微差异,且聚类结果所对应的拣选路程、拣选时间相差较大。基于上述缺点,本文提出一种改进K-均值算法以达到缩小拣选时长的目的。

针对每簇的路径规划和拣选时长计算过程,利用遗传算法解决这类复杂的非线性优化问题时表现出较好的鲁棒性^[20]。但在拣选点过多情况下,遗传算法会表现得计算时间长且结果不理想。但在利用K-均值算法聚类后再分别求解,可缩短计算时间,且结果较优。

算法步骤大致可分为5步:

Step1:初步聚类。

K-均值算法对空间点聚类通常会利用欧氏距离和曼哈顿距离计算粒子至中心点距离。本文在使用K-均值算法进行初聚类步骤时考虑到三维情况,距离计算公式如下:

$$d_{(O_t, i)} = |x_{O_t} - x_i| + |y_{O_t} - y_i| + |z_{O_t} - z_i| \quad (O_t \in O) \quad (6)$$

其中, $(x_{O_t}, y_{O_t}, z_{O_t})$ 为 O_t 簇的中心点, $d_{(O_t, i)}$ 为 O_t 簇的中心点至拣选点*i*的距离。在经过K-均值算法初步聚类后,每簇拣选时长相差较大。因此,在此聚类基础上要根据拣选点对应零部件的质量、体积属性对所归属簇类再次变换。

Step2:更新每簇3部分信息。

每簇中心点计算公式如下:

$$x_{O_t} = \sum_{i \in P} x_i \times y_{ir} / N, y_{O_t} = \sum_{i \in P} y_i \times y_{ir} / N, z_{O_t} = 0 \quad (7)$$

每簇质量之和如下:

$$\sum_{i \in P} \sum_{r \in R} m_i \times y_{ir} \quad (8)$$

每簇体积之和如下：

$$\sum_{i \in P} \sum_{r \in R} v_i \times y_{ir} \quad (9)$$

Step3: 遗传算法路径规划。

通过遗传算法对每簇进行路径规划和拣选时长计算。在计算机上进行多次试验运算,可保证在得到最优解情况下达到最短运算时间,参数可设置为:每一代随机产生个体数量为60,遗传代数为50,变异概率为0.1,交叉概率为0.75,交叉方式使用顺序交叉。遗传算法使用精英保留方法。

Step4: 指标排序进行拣选点变换。

由Step3得到每簇拣选时长,可通过该指标进行由小到大排序。排序后拣选时间最短的簇可从其他簇内拿一个距离此簇中心点最近且满足质量之和与体积之和不超过上限的拣选点,若超过上限则选择距离第二近的拣选点并检查是否满足条件,以此类推直到选择到合适的拣选点。在计算距离时为了使各簇拣选时间差距更小,使用计算距离公式如下,其中 $\alpha = 1, \beta = 1, \chi = -0.5$ 可以让货架位置高的优先被选走,且每簇的中心坐标可设置为 $(x_{0i}, y_{0i}, 0)$ 。

$$d_{(0i,i)} = |x_{0i} - x_i| \cdot \alpha + |y_{0i} - y_i| \cdot \beta + |z_i| \cdot \chi \quad (10)$$

之后排序拣选时间第二短的簇从剩余其他簇内拿一个拣选点,依次类推。聚K类则会有 $K - 1$ 次拣货点所属簇类变换。

Step5: 迭代循环选择最优解。

Step2、Step3、Step4进行T次循环,过程中记录每次迭代结果每簇的拣选时间、拣选路程等数值,根据优化目标选择最优结果。

算法流程如图2所示,虚线框选部分为一个大步骤,其中遗传算法不作详细描述。

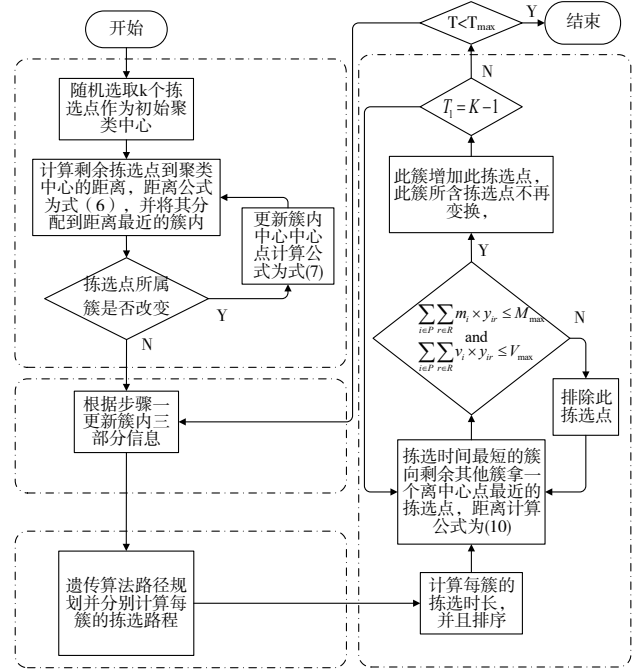


Fig. 2 Algorithm flow

图2 算法流程

4 实例验证

本文以某安防设备制造企业零部件存储仓库为例,对该仓库一段时间内的订单需求数据进行实例验证。

根据配送时间对订单分批后可得到待拣选订单汇总情况。抽取所需拣选相关信息整合情况如表1所示。目前,有3位拣货人员为空闲状态,正在等待分配任务准备拣选,因此利用K-均值算法聚3类(将任务分为3份)。式(2)中,拣货人员推物料小车步行速度 v 为1 m/s,基本拣选时间 t_0 取20 s, λ 取3。式(7)中, $\alpha = 1, \beta = 1, \chi = -0.5$ 。物料小车承重可达500 kg。

Table 1 Task information

表1 任务信息

待拣选零部件编号	中心坐标/m	体积/dm ³	重量/kg	待拣选零部件编号	中心坐标/m	体积/dm ³	重量/kg
1	(16.5, 13.5, 0.25)	30	29	15	(36.5, 18.5, 2.25)	55	7
2	(19.5, 18.5, 1.75)	25	11	16	(24.5, 10.5, 0.25)	15	7
3	(4.5, 2.5, 0.75)	30	11	17	(31.5, 31.5, 2.25)	45	12
4	(15.5, 7.5, 2.25)	25	15	18	(39.5, 14.5, 1.25)	15	8
5	(31.5, 2.5, 1.25)	25	7	19	(8.5, 18.5, 0.75)	25	7
6	(4.5, 31.5, 0.25)	30	12	20	(19.5, 31.5, 0.75)	25	7
7	(16.5, 10.5, 0.25)	18	17	21	(20.5, 15.5, 1.25)	30	9
8	(11.5, 18.5, 0.25)	55	25	22	(39.5, 28.5, 0.75)	15	8
9	(18.5, 3.5, 2.25)	52	9	23	(36.5, 28.5, 2.25)	30	7
10	(23.5, 28.5, 0.25)	21	23	24	(0.5, 5.5, 0.25)	45	17
11	(24.5, 10.5, 1.25)	45	9	25	(16.5, 23.5, 1.25)	15	10
12	(32.5, 14.5, 2.25)	37	8	26	(24.5, 2.5, 1.75)	30	12
13	(16.5, 10.5, 2.25)	25	7	27	(36.5, 2.5, 1.75)	20	13
14	(20.5, 28.5, 1.75)	45	11				

仓库布局为四区型仓库如图3所示,每条巷道宽度都为2 m,待拣选零部件在仓库中的分布状态较为零散。拣

货人员分配到拣选任务后会从I/O点出发,依次经过任务中拣选点,再回到I/O点,将零部件统一调配送往产线。

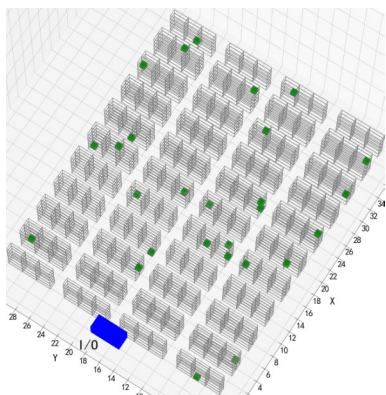


Fig. 3 Warehouse layout

图3 仓库布局

根据零部件坐标信息,首先利用K-均值算法进行初步聚类可得到聚类后每簇所包含拣选点分类信息如表2左侧所示,聚类可视化结果如图4左侧所示。其聚类结果存在不均匀现象,如Class1内分配了13个待拣选点,但Class2内仅有6个,相差7个拣选点。

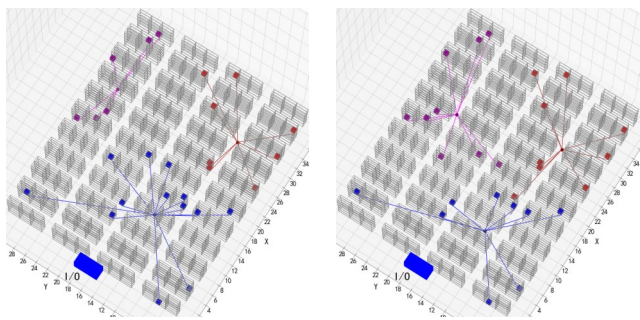


Fig. 4 Cluster visualization results

图4 聚类可视化结果

将经过初步聚类的结果再进行拣选点所属簇变换,每代记录每簇的拣选时间。如图5所示,在均匀聚类规则迭代过程中,到第六代便可以得到一个相对满意解。第六代

的每簇拣选时间相差最小,且拣选时长最短。

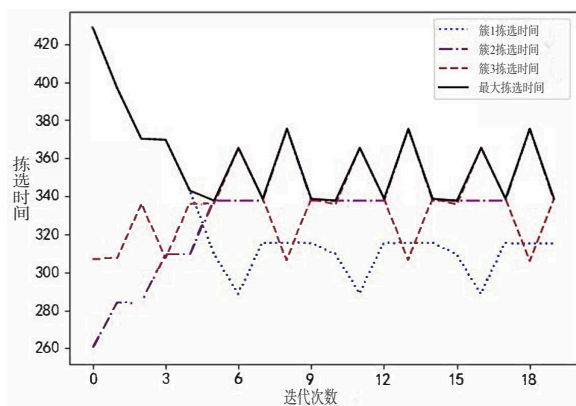


Fig. 5 Picking time iteration diagram

图5 拣选时间迭代图

但在第六代之后仍然按程序进行循环,拣选点会进行周期交换,导致之后的数据记录情况表现为六代一周期的循环变换。第五代聚类结果如表2右侧所示,聚类可视化结果如图4右侧所示。

利用遗传算法对聚类结果进行路径规划后,分别得到拣选路程和对应的拣选任务时长。为验证本文方法可以将零部件拣选任务更加均匀地进行分配,选择K-均值算法和谱聚类算法作比较。对拣选点进行任务分配,确定任务分配数量为3份,计算得到任务完成时间。3种聚类算法任务分配的验证结果如表3所示。

本实验样本大小为27,根据表3可知使用K-均值算法分配此次零部件拣选任务总路程为363 m,任务完成时间为438.5 s。通过谱聚类算法得到的零部件分配拣选任务,总路程为345 m,任务完成时间为412.75 s。通过改进K-均值算法得到的零部件分配拣选任务,总路程为358 m,任务完成时间为337.75 s。结果表明,相较于其他两种聚类算法,通过改进K-均值算法能让任务分配相对更加均匀合理,任务完成时长大幅缩短且效果显著。

Table 2 Clustering results

表2 聚类结果

初步聚类结果	所包含拣选零部件编号	粒子变换后结果	所包含拣选零部件编号
Class1	1, 2, 3, 4, 6, 7, 8, 9, 13, 19, 21, 24, 25	Class1	1, 3, 4, 6, 7, 8, 9, 19, 24
Class2	10, 14, 17, 20, 22, 23	Class2	2, 10, 14, 17, 20, 21, 22, 23, 25
Class3	5, 11, 12, 15, 16, 18, 26, 27	Class3	5, 11, 12, 13, 15, 16, 18, 26, 27

Table 3 Cluster batching results comparison

表3 聚类分批结果比较

方法	分批数量	任务分配	任务所包含的拣选点	拣选顺序	拣选路程/m	拣选时间/s
K-均值算法	3	1	1, 2, 3, 4, 6, 7, 8, 9, 13, 19, 21, 24, 25	[0-24-3-9-4-13-7-1-21-2-25-6-8-19-0]	129	438.5
		2	10, 14, 17, 20, 22, 23	[0-14-10-22-23-17-20-0]	116	260
		3	5, 11, 12, 15, 16, 18, 26, 27	[0-16-11-26-5-27-18-15-12-0]	118	315.5
谱聚类	3	1	2, 6, 8, 10, 14, 19, 20, 25	[0-19-8-2-25-10-14-20-6-0]	82	264.5
		2	1, 3, 4, 5, 7, 9, 11, 13, 16, 21, 24, 26	[0-3-9-5-26-16-11-21-1-7-13-4-24-0]	124	421.75
		3	12, 15, 17, 18, 22, 23, 27	[0-12-27-18-15-22-23-17-0]	139	318.75
改进K-均值算法	3	1	1, 3, 4, 6, 7, 8, 9, 19, 24	[0-24-3-9-4-7-1-8-19-6-0]	109	310.75
		2	2, 10, 14, 17, 20, 21, 22, 23, 25	[0-21-14-10-22-23-17-20-25-2-0]	121	337.75
		3	5, 11, 12, 13, 15, 16, 18, 26, 27	[0-21-16-11-18-27-5-26-9-3-0]	128	335.75

5 结语

缩短零部件拣选环节可极大提升企业生产效率。本文针对某安防设备制造企业仓库零部件拣选任务分配环节进行研究,在拣选点多、解空间大的情况下,利用启发式算法进行任务分配计算时间过长且达不到满意解,而在单使用K-均值算法聚类情况下,每簇拣选点数量不均匀,且拣选时长相差较大。为了达到零部件拣选任务总完成时长更短的目的,在K-均值算法基础上增加“拣选点所属簇变换”的操作,利用遗传算法对每簇的拣选时长进行计算,依据拣选时长进行拣选点所属簇变化可得到相对拣选任务分配更加合理的结果,达到缩短总拣选时长的目的。

仿真试验结果表明,在此情况下利用改进K-均值算法相比单使用聚类算法进行任务分配可以更加均匀合理地分配任务,减小总拣选时长,验证了该算法的有效性。本文聚类后拣选点所属簇变化的依据是拣选时长,但在其他场景中每簇衡量标准不同且衡量标准为多维,在有更多的衡量标准情况下需要融合其他模型并加以完善。此方法可考虑应用在其他类型的任务打包分配处理问题上以达到某方面的均匀目的,尤其是针对数量较大的任务包分配。

参考文献:

- [1] BAI X S, YAN W S, CAO M. Clustering-based algorithms for multivehicle task assignment in a time-invariant drift field[J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2017, 2(4): 2166-2173.
- [2] PENDHARKAR P C. An ant colony optimization heuristic for constrained task allocation problem[J]. Journal of Computational Science, 2015, 7: 37-47.
- [3] LI F Q. Research on multi-robot task allocation based on consistent package algorithm[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2022.
李富强. 基于一致性包算法的多机器人任务分配研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2022.
- [4] ZHANG W L, HUO Z L, ZHAO X Y, et al. Wireless distributed collaborative decision-making for multi-robot positioning in smart factories[J]. Radio Communication Technology, 2022, 48(4): 718-727.
张文璐, 霍子龙, 赵西雨, 等. 面向智能工厂多机器人定位的无线分布式协同决策[J]. 无线电通信技术, 2022, 48(4): 718-727.
- [5] ZHANG X L, TAN Y J, YANG Z W. Resource allocation optimization of equipment development task based on MOPSO algorithm[J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2019, 30(6): 1132-1143.
- [6] SHAO Z Y, DONG B L. Multi-variety and small-batch order batching method based on improved genetic K-means algorithm[J]. Journal of Zhejiang Sci-Tech University (Natural Science Edition), 2018, 39(6): 732-738.
邵泽熠, 董宝力. 基于改进遗传K-均值算法的多品种小批量订单分批方法[J]. 浙江理工大学学报(自然科学版), 2018, 39(6): 732-738.
- [7] HU X J, WEI C H. Order batching optimization based on Canopy and k-means algorithm[J]. Journal of Hefei University of Technology (Natural Science Edition), 2017, 40(3): 414-419.
胡小建, 韦超豪. 基于Canopy和k-means算法的订单分批优化[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2017, 40(3): 414-419.
- [8] LI Z P, TIAN Y X, BU X Q, et al. Order batching problem in unmanned warehouse system and K-max clustering algorithm[J]. Computer Integrated Manufacturing System, 2021, 27(5): 1506-1517.
李珍萍, 田宇璇, 卜晓奇, 等. 无人仓系统订单分批问题及K-max聚类算法[J]. 计算机集成制造系统, 2021, 27(5): 1506-1517.
- [9] MA T W, LEI Q S, LI J, et al. Research on particle swarm optimization algorithm and its application in order batching[J]. Logistics Technology, 2016, 39(3): 4-8.
马廷伟, 雷全胜, 李军, 等. 粒子群算法及其在订单分批中的应用研究[J]. 物流科技, 2016, 39(3): 4-8.
- [10] WANG X P, ZHANG J, MA J. Online order batching model and algorithm for e-commerce with due date[J]. Management Science, 2014, 27(6): 103-113.
王旭坪, 张璐, 马骏. 考虑完成期限的电子商务在线订单分批模型及算法[J]. 管理科学, 2014, 27(6): 103-113.
- [11] TSAI C Y, LIOU H J J, HUANG T M. Using a multiple-GA method to solve the batch picking problem: considering travel distance and order due time[J]. International Journal of Production Research, 2008, 46(22): 6533-6555.
- [12] WANG S S, ZHANG J H. 'Goods to people' picking system order batch optimization[J]. Complex System and Complexity Science, 2022, 19(3): 74-80.
王姗姗, 张纪会. “货到人”拣选系统订单分批优化[J]. 复杂系统与复杂性科学, 2022, 19(3): 74-80.
- [13] WU R C, HE J J, LI X, et al. Order batching problem based on hybrid metaheuristic algorithm[J]. Control and Decision, 2022, 37(8): 2110-2118.
吴仁超, 贺建军, 李欣, 等. 基于混合元启发式算法的订单分批问题[J]. 控制与决策, 2022, 37(8): 2110-2118.
- [14] QIN X, ZHAO J D, REN N. Research on order batching strategy based on clustering algorithm[J]. Manufacturing Automation, 2021, 43(1): 134-137.
秦馨, 赵剑道, 任楠. 基于聚类算法的订单分批策略研究[J]. 制造业自动化, 2021, 43(1): 134-137.
- [15] LI L S, YU H. Application of improved ant colony algorithm in robot path planning in complex environment[J]. Microcomputer System, 2017, 38(9): 2067-2071.
李龙澍, 喻环. 改进蚁群算法在复杂环境中机器人路径规划上的应用[J]. 小型微型计算机系统, 2017, 38(9): 2067-2071.
- [16] GAO G, ZHANG G, HUANG G, et al. Solving material distribution routing problem in mixed manufacturing systems with a hybrid multi-objective evolutionary algorithm[J]. Journal of Central South University, 2012, 19(2): 433-442.
- [17] YANG Q, CHEN Z L. Research on workshop material distribution method based on improved particle swarm optimization algorithm[J]. Mechanical Design and Manufacturing, 2022(8): 238-241.
杨倩, 陈再良. 基于改进粒子群算法的车间物料配送方法研究[J]. 机械设计与制造, 2022(8): 238-241.
- [18] WU Y W, NIU Z Y, LI Z P. Picking path planning of container robot based on improved genetic algorithm[J]. Journal of System Simulation, 2023, 35(5): 1086-1097.
吴玉文, 牛智越, 李珍萍. 基于改进遗传算法的货箱机器人拣选路径规划[J]. 系统仿真学报, 2023, 35(5): 1086-1097.
- [19] WANG S X, HUANGFU Y Y. Research on artificial picking operation path optimization based on cat swarm algorithm[J]. China Storage and Transportation, 2020(3): 116-119.
王晟旭, 皇甫遥遥. 基于猫群算法的人工拣选作业路径优化研究[J]. 中国储运, 2020(3): 116-119.
- [20] CHEN X. Research on mobile robot path planning based on genetic algorithm[J]. Technology and Industry, 2023, 23(8): 274-278.
陈旭. 基于遗传算法的机器人路径规划研究综述[J]. 科技和产业, 2023, 23(8): 274-278.

(责任编辑: 孙娟)