

控制与决策

Control and Decision

一类多模块网络存储系统分散式控制方法

郭鹏辉, 贾正荣, 肖飞, 芮万智, 许金

引用本文:

郭鹏辉, 贾正荣, 肖飞, 等. 一类多模块网络存储系统分散式控制方法[J]. *控制与决策*, 2022, 37(2): 438–444.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.1218>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于协同控制的串联超级电容电压均衡策略

Voltage equalization strategy for series-connected ultracapacitors based on cooperative control

控制与决策. 2021, 36(8): 1997–2001 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1736>

基于多目标优化的Holonic-C2组织协作式资源动态调度方法

Holonic-C2 organization collaborative resource dynamic scheduling method based on multi-objective optimization

控制与决策. 2021, 36(6): 1472–1481 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1032>

多航天器系统分布式固定时间输出反馈姿态协同跟踪控制

Distributed fixed-time output feedback attitude coordination tracking control for multiple rigid spacecraft

控制与决策. 2021, 36(5): 1049–1058 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0968>

基于神经动态优化的非线性系统近似最优跟踪控制

Approximate optimal tracking control for nonlinear systems based on neurodynamic optimization

控制与决策. 2021, 36(1): 97–104 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0056>

一类非线性大系统分散自适应预设性能有限时间跟踪控制

Decentralized adaptive prescribed performance finite-time tracking control for a class of large-scale nonlinear systems

控制与决策. 2020, 35(12): 3045–3052 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0623>

一类多模块网格存储系统分散式控制方法

郭鹏辉, 贾正荣, 肖飞[†], 芮万智, 许金

(海军工程大学 舰船综合电力技术国防科技重点实验室, 武汉 430033)

摘要: 针对多模块网格存储系统中的多分拣点货物排列问题, 提出一种解耦的分散式控制方法, 将问题解耦为各存储模块的独立调度和模块之间的协调调度. 模块内采用循环移动方式进行独立调度, 模块间通过交换需求和模块状态控制协调过程. 在不同参数条件下进行仿真实验, 并与集中式控制方法进行对比仿真, 结果表明分散式控制方法能够在各种工况下稳定有效地求解, 且相比于集中式控制方法的结果更优, 求解时间更短, 验证了所提方法的有效性和通用性.

关键词: 多模块网格存储系统; 多分拣点; 货物排列; 分散式控制

中图分类号: TP273

文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2020.1218

引用格式: 郭鹏辉, 贾正荣, 肖飞, 等. 一类多模块网格存储系统分散式控制方法 [J]. 控制与决策, 2022, 37(2): 438-444.

Decentralized control method for multi-module grid-based storage system

GUO Peng-hui, JIA Zheng-rong, XIAO Fei[†], RUI Wan-zhi, XU Jin

(National Key Laboratory of Vessel Integrated Power System Technology, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

Abstract: To solve the cargo arrangement problem of multiple picking stations in the multi-module grid-based storage system, a decoupled decentralized control method is proposed, which decouples the problem into independent scheduling of each module and cooperative scheduling between modules. The cycle movement method is used for independent scheduling within the module, and the cooperative scheduling is realized by exchange requirements and module states. Simulation is carried out under different parameters, and a comparative simulation with a centralized control method is given. The results show that the decentralized control method can get solutions stably and effectively under various conditions, and can get better solutions and shorter computing time than the centralized control method. The effectiveness and universality of the proposed method are verified.

Keywords: multi-module grid-based storage system; multiple picking stations; cargo arrangement; decentralized control

0 引言

随着电子商务、制造业的快速发展, 自动化仓储系统得到了越来越多的关注和应用, 已成为现代物流系统的重要组成部分^[1-4]. 网格存储系统^[5-6](grid-based storage system, GBS system, 又称 PBS system) 是一种以矩形储位为基本组成单元的新型存储系统, 每个储位上为货物负载或空位, 负载可以移动到相邻的空位. GBS 系统存储密度大, 易于安装布局, 已应用于仓库和配送中心、自动停车系统和集装箱码头等领域^[7-9].

现有文献主要针对单一模块形式的 GBS 系统,

研究负载检索出库的方法. 这些文献的模型假设主要区分在以下两点: 1) 单一负载检索或多负载检索问题; 2) 空位的数量以及初始位置.

对于单负载检索问题, Gue 等^[6]首次提出基于“15 数码”游戏的 PBS 系统, 研究了单个空位在左下角或多个空位在左下角排成一行的初始条件下, 负载出库的最优方法; Kota 等^[10]对文献 [6] 的工作进行了理论扩展, 推导了单个或两个空位任意分布配置下, 单负载出库的最优方法, 而对于空位数量超过两个的配置, 开发了一种启发式方法; Alfieri 等^[11]提出了一种使用 AGVs 进行移动的 GBS 系统, 系统中多个

收稿日期: 2020-09-02; 录用日期: 2020-12-03.

基金项目: 国家自然科学基金项目 (52077218).

责任编委: 刘民.

[†]通讯作者. E-mail: xfeininger@qq.com.

空位在出库点处排成一行,采用与文献[6]类似的启发式方法;Yalcin等^[12]研究了GBS系统中多个空位任意分布时单负载出库的最优方法,采用的是A*搜索算法,其仿真结果表明采用特定的搜索估计函数可以求解 10×10 规模GBS系统的最优解,对于更大规模的问题则采用启发式方法.对于多负载检索问题,Mirzaei等^[13]研究单个空位位于左下角时的多负载联合检索问题,提出了2个负载联合检索的最优方法和3个以上负载联合检索的启发式方法.

上述文献都以单一模块形式的GBS系统为研究对象,而GBS系统具有良好的模块化特征和扩展能力,多个子GBS模块连接构成更大的仓储系统(multi module grid-based storage system, MMGBS system),从而根据实际使用需求进行灵活的硬件配置.但在现有文献的研究方法和控制形式下,MMGBS系统难以满足实际使用需求和发挥其灵活配置的优点.一方面,多个GBS子模块连接后形成的MMGBS系统规模较大,其实际运行场景和使用需求更加复杂,现有文献多在有限规模和特定的模型假设下进行研究,相关的研究方法难以直接适用;另一方面,现有文献多采用集中式控制形式,当系统进行模块扩展或更改时,可能会造成整个软件和控制逻辑的更改.因此,需要在控制方法和架构层面提出新的控制方法,以满足MMGBS系统的实际使用需求,发挥其灵活扩展和配置的优点.本文研究一种MMGBS系统的多分拣点货物排列问题,采用分散式控制架构,将问题解耦为模块内的独立调度过程和模块间的协调调度过程,以快速地求得高质量方案,并在控制层面上良好地适应系统的扩展和更改.

1 问题描述

1.1 MMGBS系统

MMGBS系统如图1所示.系统分为拣货区和备货区:备货区配置1个备货模块,拣货区配置多个拣货模块,各存储模块为矩形循环结构.每个拣货模块都与备货模块相连接,各拣货模块的左下角为分拣点,因此MMGBS具有多个分拣点,与拣货模块一一对应.为保证系统正常运转,每个模块内保留至少一个空位.系统中存储多种货物.

MMGBS系统的基本工作流程为:当系统的一个分拣点接收到出库订单时,检索分拣点对应的拣货模块,如果包含所需类型的货物,则该拣货模块将货物移动至分拣点出库;如果该拣货模块内没有所需类型的货物,则检索备货模块,在备货模块中检索到所需类型的货物后,备货模块将货物移动至该拣货模

块,再由该拣货模块移动至分拣点出库.

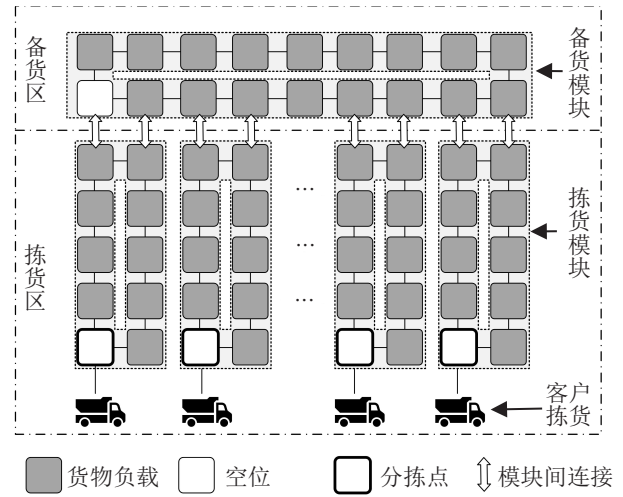


图1 MMGBS系统组成示意

1.2 多分拣点货物排列问题

1.2.1 符号和相关定义

s : MMGBS系统的状态. 系统状态由各模块状态描述,各模块的状态由其储位上的货物类型描述,空位看作特殊类型, $s = [s_1^{pm}, \dots, s_k^{pm}, \dots, s_K^{pm}, s^{sm}]$. 其中: $s_k^{pm} = [l_{k,1}^{pm}, \dots, l_{k,n}^{pm}, \dots, s l_{k,N}^{pm}]$ 为拣货模块 k 的状态, N 为各拣货模块容量; $s^{sm} = [l_1^{sm}, \dots, l_m^{sm}, \dots, l_M^{sm}]$ 为备货模块的状态, M 为备货模块容量;模块状态中元素 l 的值表示对应储位的货物类型, $l = 0$ 表示对应的储位是空位.

Q_k : 拣货模块 k 接收的订单序列, $Q_k = [q_{k,1}, \dots, q_{k,i}, \dots, q_{k,n_k}]$. 其中: n_k 为该订单序列的长度, $q_{k,i}$ 为该订单第 i 个任务所需的货物类型.若对于拣货模块 k 及其状态 $s_k^{pm} = [l_{k,1}^{pm}, \dots, l_{k,n}^{pm}, \dots, l_{k,N}^{pm}], \forall i \in \{1, 2, \dots, n_k\}$,都有 $l_{k,i}^{pm} = q_{k,i}$,则称拣货模块 k 完成订单序列 Q_k .

s^g : 系统的目标状态. 系统在一个批次内,有多个拣货模块接收批量订单序列 $\{Q_k\}$,当所有订单序列都完成时,称此时的系统状态 s^g 为目标状态.

A_s : 在状态 s 下所有可能的移动动作集合. $a \in A_s$ 为状态 s 下可执行的某一组移动动作,耗时1步.

$P = (a_1, a_2, \dots, a_E)$: 完成批量订单 $\{Q_k\}$ 的动作序列方案,由一系列移动动作组成,使系统由初始状态 s 变换到目标状态 s^g . $f(P) = E$ 为方案 P 的序列长度,即方案所需的移动步数.

1.2.2 问题模型

首先建立系统状态和移动动作之间的关系模型.为简要说明,以5个位置的GBS系统为例,如图2所示.移动前状态为 $s = [l_1, l_2, 0, l_4, 0]$,移动后状态为 $s' = [l_1, 0, l_2, 0, l_4]$,则移动动作可表示为矩阵 $a =$

$[a_{ij}]$,使得 $s' = sa$. 其中 $a_{ij} \in \{0, 1\}$, $a_{ij} = 1$ 表示经过该次移动后,第 i 个储位的负载移动到第 j 个储位;否则 $a_{ij} = 0$.

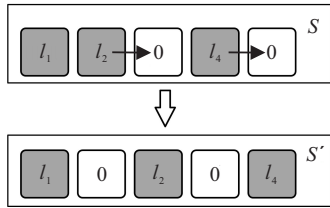


图2 GBS系统状态变换示意

图2中,在移动前后,1号储位负载不变,2号储位的负载 l_2 移动到3号储位,4号储位的负载 l_4 移动到5号储位,则有 $a_{11} = 1, a_{23} = 1, a_{45} = 1$. 该次移动过程的动作矩阵 a 表示为

$$a = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

并且 $s' = sa$,符合矩阵的运算规则. 多分拣点货物排列问题的模型构建如下:

$$\min f(P). \tag{1}$$

其中

$$P = (a_1, a_2, \dots, a_E), \tag{2}$$

$$s^g = sa_1 a_2 \dots a_E, \tag{3}$$

$$\forall e \in \{1, 2, \dots, E\}, a_e \in A_{sa_1 \dots a_{e-1}}. \tag{4}$$

式(1)表示目标函数,动作序列方案的步数最少;式(2)、(3)表示所求动作序列方案 (a_1, a_2, \dots, a_E) 应使系统到达目标状态 s^g ,完成所有的订单序列;式(4)表示每一步执行的动作 a_e 为当前状态 $sa_1 \dots a_{e-1}$ 下的合理可行动作.

2 分散式控制方法

本节所涉及的相关概念和定义如下.

定义1(接口位置) 接口位置是一个模块与其他模块相连通从而可进行货物移动的位置. 若备货模块SM的储位 i 与拣货模块 PM_k 的储位 j 相连通,则称储位 i 是模块SM对应于模块 PM_k 的接口位置,储位 j 是模块 PM_k 对应于模块SM的接口位置.

定义2(交换动作) 交换动作指负载从一个模块的接口位置移动至相邻模块的接口位置的过程,交换动作是两个模块的共同动作. 交换动作涉及的两个模块的接口位置中,一个接口位置为负载,一个接口位置为空位. 只有当进行交换动作时,两个模块需要同步,其余时间各模块可以独立异步运行.

定义3(交换需求) 当模块内缺少资源(货物或

者空位)时,则向相邻模块发起一个交换需求. 交换需求涉及两个相邻的模块,与交换动作一一对应.

定义4(内部动作) 负载在模块内从一个位置移动到相邻位置的过程,称为内部动作.

2.1 控制架构

构建如图3所示的分散式控制架构,将任务解耦为模块内独立调度和模块间协调调度. 备货模块和拣货模块无交换动作时,各模块内部执行独立调度算法;反之,备货模块和拣货模块协调,完成二者之间的交换动作.

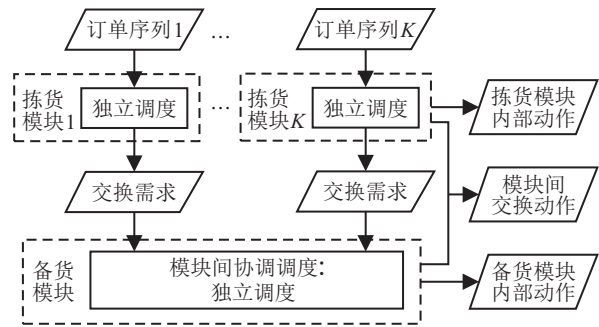


图3 MMGBS系统的分散式控制架构

2.2 模块内独立调度

模块内调度用于将指定货物移动到目标位置. 各存储模块的基本组成形式为循环结构,因此模块内调度的基本单元即循环结构内的移位调度. 为方便表述,作如下设定.

1) $f_1(i)$ 表示位置 i 在顺时针方向的下一个储位编号, $f_2(i)$ 表示位置 i 在逆时针方向的下一个储位编号, n 表示循环结构的总体储位数量,则有

$$f_1(i) = \begin{cases} i + 1, & i < n; \\ 1, & i = n. \end{cases} \tag{5}$$

$$f_2(i) = \begin{cases} i - 1, & i > 1; \\ n, & i = 1. \end{cases} \tag{6}$$

2) 设 g 表示待调度的指定货物的储位编号, h 表示目标储位编号, $Seq(a)$ 表示调度货物到目标位置所需的动作序列, E 表示动作序列 $Seq(a)$ 对应的动作步数.

以顺时针方向循环为例,循环结构内移位调度的算法步骤如下:

step 1: 初始化. $Seq(a) \leftarrow \emptyset, E \leftarrow 0$.

step 2: 检测指定货物是否已到达目标位置,即 $g = h$ 是否成立. 如果是,则调度结束,输出动作序列 $Seq(a)$ 和动作步数 E ; 如果不是,则令 $k \leftarrow g$, 转至 step 3.

step 3: 将指定位置货物尝试向前(顺时针方向)移动. 若 $f_1(g)$ 位置是空位,则货物向前移动, $g \leftarrow$

$f_1(g), E \leftarrow E + 1$,更新动作序列 $\text{Seq}(\mathbf{a})$,转至 step 2;若 $f_1(k)$ 位置不是空位,则 $k \leftarrow f_1(k)$,转至 step 4.

step 4: k 位置的货物尝试向前(顺时针方向)移动.若 $f_1(k)$ 位置是空位,则货物向前移动, $k \leftarrow f_1(k)$, $E \leftarrow E + 1$,更新动作序列 $\text{Seq}(\mathbf{a})$,转至 step 3;若 $f_1(g)$ 位置不是空位,则 $k \leftarrow f_1(k)$,转至 step 4.

逆时针方向循环的调度过程与顺时针相同,在相应的步骤中使用 $f_2(i)$ 表示下一位置.分别求解两个循环方向的动作序列和动作步数,选择动作步数较小的作为调度结果.

2.3 模块间协调调度

拣货模块无法独立完成其订单序列时,需要与备货模块进行交换动作,通过模块间协调调度进行.协调调度过程分两部分:交换需求处理和交换动作控制.

2.3.1 交换需求处理

拣货模块根据自身状态和目标状态,确定完成其订单序列需要移入和移出的货物,向备货模块发起交换需求.

将拣货模块发起的交换需求记为向量 $\mathbf{r} = [r_1, r_2, r_3]^T$.其中: r_1 为需求类型, $r_1 = 0$ 时,表示移出的交换动作,拣货模块将所需移出的货物移动到自身的接口位置,备货模块根据该需求信息将自身对应的接口位置置为空位; $r_1 \neq 0$ 时,表示移入的交换动作,拣货模块将自身的接口位置置为空位,备货模块将类型为 r_1 的货物移动到自身对应的接口位置. r_2 确定交换动作所经由的接口序号(模块间的接口位置可能不唯一). r_3 表示当前状态下,拣货模块将待交换资源移动至接口位置的剩余动作步数,通过独立调度计算得到,并随着系统的动作而更新.

备货模块接收各拣货模块的交换需求,调度内部的货物或空位资源响应需求.将备货模块接收的交换需求集合记为 \mathbf{R} ,则备货模块优先处理的交换需求为

$$\mathbf{r}_{\text{pri}} = \arg \min_{\mathbf{r} \in \mathbf{R}} r_3. \quad (7)$$

即每次对 r_3 最小的交换需求进行处理, r_3 越小,表示对应的拣货模块越先达到交换动作的状态,从而其执行交换动作的需求越迫切.备货处理需求的过程为,将需求信息对应的货物或空位移动(即 r_1)至对应的接口位置(即 r_2),该过程通过独立调度实现.

2.3.2 交换动作控制

交换动作是拣货模块和备货模块的共同动作,在进行交换动作时,涉及的两个模块需要进行同步,通过模块的运行状态控制交换动作执行的过程.每个

存储模块根据正在执行的动作类型,分为4种运行状态,分别定义如下:

- 1) 空闲:当前模块无待执行动作和执行中的动作.
- 2) 等待:当前模块正在等待执行交换动作,即待交换的资源(货物或空位)已到达接口位置.
- 3) 移动:当前模块正在执行模块内部动作.
- 4) 交换:当前模块正在执行交换动作,只有相邻两个模块都到达“等待”状态后才进入“交换”状态.

交换动作执行过程通过模块的运行状态控制,相邻两个模块有待执行的交换动作时,通过“等待”状态进行同步,一方的待交换资源到达接口位置后,等待另一方的待交换资源到达对应的接口位置,双方都到达“等待”状态后,即执行交换动作.

拣货模块和备货模块之间的协调调度过程如图4所示,该过程表述如下:

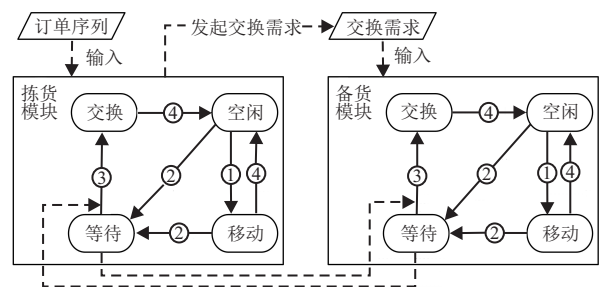
step 1: 拣货模块发起交换需求.各拣货模块根据自身状态和订单序列,计算完成订单序列需要移入或移出的货物,发起交换需求.

step 2: 拣货模块内部动作.拣货模块根据自身发起的交换需求,将所需货物(或空位)移动至接口位置,转入“移动”状态,移动过程通过独立调度实现.所需资源到达接口位置后,转到“等待”状态.

step 3: 备货模块处理交换需求.备货模块接收各拣货模块的需求,选择最迫切的需求,将所需资源移动至接口位置,转入“移动”状态,移动过程通过独立调度实现.所需资源到达接口位置后,转到“等待”状态.

step 4: 交换动作执行.每个时间步周期,备货模块和拣货模块获取对方的运行状态,当双方都处于“等待”状态时,执行交换动作;正在执行交换动作的双方转到“交换”状态.

通过循环地进行上述“发起需求,需求处理,交换动作”的过程,最终完成所有订单序列任务.



- ① 有模块内部动作待执行:进行模块内独立调度
- ② 有交换动作待执行,待交换资源已位于模块接口位置
- ③ 相邻的模块已处于“等待”状态
- ④ 当前模块无待执行任务和执行中的任务

图4 协调调度过程

图5所示为MMGBS系统完成某一拣货模块订单序列的算例,通过独立调度和协调调度过程实现,图中储位色块中的数字表示货物类型. 拣货模块初始状态为[0,0,0,1,3,2,0,0],其订单序列对应的目标状态为[1,2,3]. 图5中,过程①、④为交换动作,通过协调调度完成;过程②、③、⑤为模块内部动作,通过独立调度完成.

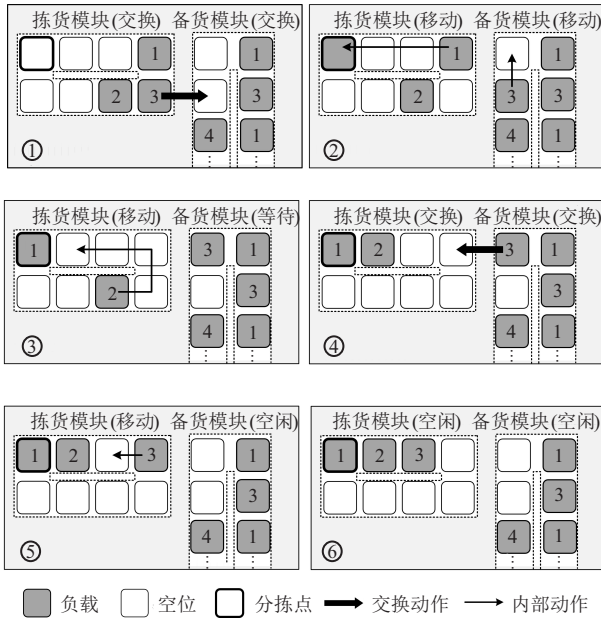


图5 拣货模块排列过程(局部)

3 数值仿真与结果分析

为验证本文所提分散式控制方法的有效性和通用性,在Matlab 2018a上实现详细的软件控制算法. 算法运行环境: Intel(R) Core(TM) i5-4590 CPU @3.30 GHz, RAM 8 GB.

实验的固定参数: 备货模块的储位容量为50,每个拣货模块的储位容量为10;每个拣货模块的5、6号储位为其接口位置与备货模块连接. 实验的可变参数: 系统中货物种类 n_{type} , 备货模块存储率 O_{sm} , 拣货模块初存储率 O_{pm} , 拣货模块的数量 K_{pm} . 系统初始分布状态根据实验参数以均匀分布生成.

实验的订单输入条件: 每个拣货模块均接收订单,将每个拣货模块的初始存储状态乱序排列,重新生成的序列作为该拣货模块的订单序列输入.

实验指标: 1) 完成所有订单的货物排列任务所需的移动步数; 2) 仿真过程的计算时间.

实验结果分为两部分: 1) 不同参数条件下的算法性能实验; 2) 与集中式控制算法的对比实验.

3.1 算法性能实验

模块配置上,系统的拣货模块数量设定为8个,并保持不变,改变货物种类、模块存储率等参数,验

证本文所提分散式控制方法在各工况下求解的有效性. 在下列3种参数条件下,各生成100组实例进行仿真求解,结果取算数平均值,结果分别如表1~表3所示.

1) 将系统中货物种类设定为不同数值,备货模块和拣货模块存储率都为80%;

2) 将备货模块存储率设定为不同数值,拣货模块存储率为80%,货物种类为4;

3) 将拣货模块存储率设定为不同数值,备货模块存储率为80%,货物种类为4.

表1 不同货物种类下的实验结果

n_{type}	$O_{sm}/\%$	$O_{pm}/\%$	移动步数	计算时间/s
3	80	80	416.10	3.2915
4	80	80	589.36	3.7894
5	80	80	670.40	4.0990
6	80	80	722.26	4.4440
7	80	80	920.88	4.7589

表2 不同存储率(备货模块)下的实验结果

n_{type}	$O_{sm}/\%$	$O_{pm}/\%$	移动步数	计算时间/s
4	50	80	469.57	2.6784
4	60	80	514.68	2.9213
4	70	80	536.45	3.1814
4	80	80	588.32	3.4494
4	90	80	609.55	3.7215

表3 不同存储率(拣货模块)下的实验结果

n_{type}	$O_{sm}/\%$	$O_{pm}/\%$	移动步数	计算时间/s
4	80	50	192.40	1.1278
4	80	60	333.13	1.5020
4	80	70	464.75	1.9633
4	80	80	567.99	2.4995
4	80	90	710.47	3.1610

由表1~表3可以看出,货物种类数量、备货模块存储率、拣货模块存储率的提高都会使实验结果指标值增加. 从总体上看,这几个参数值的增加都会使问题实例的复杂程度增加. 具体而言: 1) 货物种类数量越多时,拣货模块中的货物排列状态越复杂,在循环结构下向订单序列的目标状态调整也越困难. 2) 备货模块存储率提高时,其空位减少,在处理各拣货模块的交换需求时移动路径上受到的阻碍也越多. 3) 拣货模块存储率增加时,一方面,其空位减少,在模块内货物的移动路径上受到的阻碍也越多;另一方面,其订单序列长度随模块内初始货物数量的增加而增加,使排列过程更加复杂.

综合表1~表3,在货物种类从少到多、系统存储率从低到高的各种工况下,本文所提的分散式控制方法都能稳定有效地进行求解,计算时间不超过5s,满足实际使用的需要.

3.2 算法对比实验

保持系统的货物种类、存储率等参数率不变,改变系统的拣货模块数量配置,并与集中式控制方法进行对比仿真,验证本文所提分散式控制方法的通用性与优化性。

设计基于规则的集中式控制方法,该方法的过程为:控制拣货模块内的货物移动到备货模块内,将订单序列所需货物依次移入拣货模块。

将系统中拣货模块数量设定为不同数值,货物种类为4,拣货模块和备货模块存储率为90%。每种配置下,生成均匀分布的100组随机问题实例,分别使用集中式控制方法(centralized control, CC)和分散式控制方法(distributed control, DC)进行求解,对比2种方法的计算耗时和移动步数。

分别定义DC方法相对于CC方法的平均步数效率提升和平均计算时间效率提升为

$$\eta_{step} = \frac{s_{CC} - s_{DC}}{s_{CC}} \times 100\%$$

$$\eta_{time} = \frac{t_{CC} - t_{DC}}{t_{CC}} \times 100\%$$

其中: s_{CC} 、 s_{DC} 分别为CC和DC方法的平均步数, t_{CC} 、 t_{DC} 分别为CC和DC方法的平均计算时间。

两种方法的对比仿真结果见图6,具体数据如表4所示。根据图6和表4所示的结果可以看出:

1) 随着系统规模的增大,拣货模块数量增加,仿真需要求解的订单序列任务增加,因此使用两种方法所需的移动步数和计算时间都随之增加。

2) 在每种配置下,使用DC方法求得的移动步数和耗费的计算时间都明显小于CC方法,平均步数效率提升70%以上,平均计算时间效率提升60%以上。这是因为DC方法采用解耦式架构,各模块之间

在不进行交换动作时可以独立异步运行,使部分计算和动作执行环节可以并行。

3) DC方法和CC方法下,移动步数和计算时间随MMGBS系统规模的增大近似成线性关系,但DC方法的指标增长速率更小,增长趋势平缓,在较大规模的MMGBS系统下也有较优良的表现。这是由于在DC方法下,各模块之间在不进行交换动作时可以独立异步运行,计算和动作执行环节的并行削减了系统规模增大带来的影响。

4) 对于不同规模的MMGBS系统,本文所提的DC方法都能快速求解,结果优良,且随着系统配置规模的增大,能保持稳定良好的求解性能,相比于CC方法具有较强的通用性和优化性。

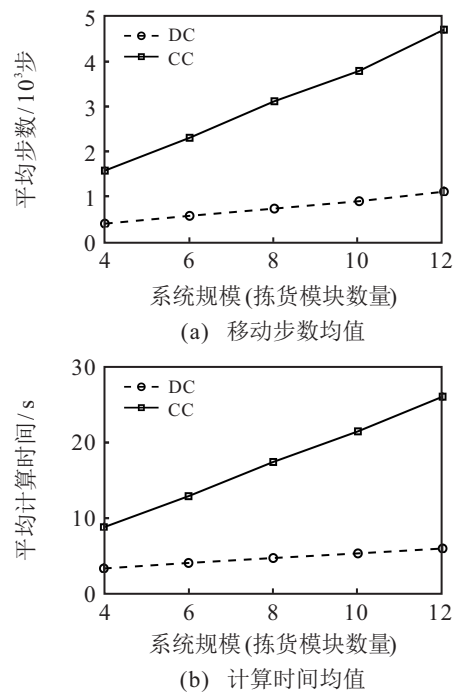


图6 不同配置规模下两种方法的仿真结果对比

表4 不同配置规模下两种方法的数据对比

拣货模块数量	s_{CC} / 步	s_{DC} / 步	η_{step} / %	t_{CC} / s	t_{DC} / s	η_{time} / %
4	1571.840	399.400	74.6	8.851	3.401	61.6
6	2297.860	572.370	75.1	12.962	4.129	68.1
8	3105.820	732.550	76.4	17.483	4.782	75.7
10	3776.030	895.670	76.2	21.531	5.393	75.0
12	4688.410	1106.420	76.4	26.120	6.039	76.9

4 结论

MMGBS系统由多个子GBS模块连接而成,具有存储密度大、模块化配置、易于扩展布局等特点。本文针对MMGBS系统的多分拣点货物排列问题,提出一种分散式控制方法,将复杂的组合优化问题解耦为模块内的独立调度和模块间的协调调度过程,避免了直接对大规模复杂问题进行求解。在不同参数条件

下的性能实验表明:本文所提的分散式控制方法在系统不同的参数工况下都能稳定有效地求解;与集中式控制方法的对比实验结果表明,本文所提的分散式控制方法在求解的移动步数和计算时间上都更加优良,且随着系统配置规模的增大,能保持稳定良好的求解性能。综上,分散式的控制方法能够快速有效地求解MMGBS系统的多分拣点货物排列问题,并且

解耦的控制架构使软件具有较强的通用性和扩展性,可以灵活地适应MMGBS系统的模块扩展与更改,满足实际使用的需求。

参考文献(References)

- [1] 杨文强, 邓丽, 牛群, 等. 改进型细菌觅食算法及多货叉仓库调度应用[J]. 控制与决策, 2015, 30(2): 321-327.
(Yang W Q, Deng L, Niu Q, et al. Improved bacterial foraging algorithm and application of warehousing scheduling with multi-shuttles[J]. Control and Decision, 2015, 30(2): 321-327.)
- [2] 蔡安江, 应嘉奇, 王坚, 等. 分散式立体仓库堆垛机调度模型[J]. 计算机集成制造系统, 2016, 22(3): 793-799.
(Cai A J, Ying J Q, Wang J, et al. Scheduling model of crane in distributed automated warehouse[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2016, 22(3): 793-799.)
- [3] 李梅娟, 陈雪波, 王莉. 多巷道固定货架拣选作业优化问题的研究[J]. 控制与决策, 2008, 23(12): 1338-1342.
(Li M J, Chen X B, Wang L. Research on order picking optimization problem for multiple aisles fixed storage racks[J]. Control and Decision, 2008, 23(12): 1338-1342.)
- [4] 马文凯, 吴耀华, 吴颖颖, 等. 基于进化算法的跨巷道多层穿梭车仓储系统的研究[J]. 机械工程学报, 2019, 55(8): 216-224.
(Ma W K, Wu Y H, Wu Y Y, et al. Research on cross-aisles multi-shuttle warehouse system based on evolutionary algorithm[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2019, 55(8): 216-224.)
- [5] Azadeh K, de Koster R, Roy D. Robotized and automated warehouse systems: Review and recent developments[J]. Transportation Science, 2019, 53(4): 917-945.
- [6] Gue K R, Kim B S. Puzzle-based storage systems[J]. Naval Research Logistics, 2007, 54(5): 556-567.
- [7] Zaerpour N, Yu Y, de Koster R, et al. Small is beautiful: A framework for evaluating and optimizing live-cube compact storage systems[J]. Transportation Science, 2017, 51(1): 34-51.
- [8] Ashgzari M S, Gue K R. A puzzle-based material handling system for order picking[J]. International Transactions in Operational Research, 2021, 8(4): 1821-1846.
- [9] Yalcin A, Koberstein A, Schocke K. Motion and layout planning in a grid-based early baggage storage system[J]. OR Spectrum, 2019, 41(3): 683-725.
- [10] Kota V R, Taylor D, Gue K R. Retrieval time performance in puzzle-based storage systems[J]. Journal of Manufacturing Technology Management, 2015, 26(4): 582-602.
- [11] Alfieri A, Cantamessa M, Monchiero A, et al. Heuristics for puzzle-based storage systems driven by a limited set of automated guided vehicles[J]. Journal of Intelligent Manufacturing, 2012, 23(5): 1695-1705.
- [12] Yalcin A, Koberstein A, Schocke K O. An optimal and a heuristic algorithm for the single-item retrieval problem in puzzle-based storage systems with multiple escorts[J]. International Journal of Production Research, 2018, 57(1/2): 1-23.
- [13] Mirzaei M, de Koster R B M, Zaerpour N. Modelling load retrievals in puzzle-based storage systems[J]. International Journal of Production Research, 2017, 55(21): 6423-6435.

作者简介

郭鹏辉(1995—), 男, 博士生, 从事仓储自动化、电力电子与电气传动的研究, E-mail: comicmagic@126.com;

贾正荣(1992—), 男, 讲师, 博士, 从事武器控制、航路规划等研究, E-mail: mintchrome@163.com;

肖飞(1977—), 男, 教授, 博士生导师, 从事电力电子与电气传动、大容量电能变换技术等研究, E-mail: xfeining@qq.com;

芮万智(1984—), 男, 副研究员, 博士, 从事网络化控制系统、位置检测等研究, E-mail: afeimeng@126.com;

许金(1983—), 男, 研究员, 博士, 从事电机设计与控制等研究, E-mail: xu_1983@yeah.net.

(责任编辑: 齐 霖)