

基于启发式动态规划的自动化停车场调度方法^①

禹鑫燚^② 卢 靓 朱熠琛 欧林林^③

(浙江工业大学信息工程学院 杭州 310000)

摘 要 为了降低自动化停车场中产生的能耗、车辆等待时间等代价,本文提出基于启发式动态规划的自动化停车场调度方法。该方法分别对车辆的质量和停放时间构造归一化函数,用于评价车辆与库位的匹配度,以实现停车场中库位的整体规划。针对停车场中停放车辆不饱和的问题,提出基于贪心算法的动态调整策略。该策略通过库位划分与状态反馈,动态调整评价函数的计算结果,从而进一步优化了对库位的整体规划。实验将贪心算法与以质量、停放时间以及两者组合作为决策函数的算法相比较。结果表明,本文提出的启发式动态规划算法能够实时决策,适应进车速率波动较大的情况,同时降低整个停放过程产生的代价。

关键词 车辆路径,启发式,动态规划,实时决策,自动化

0 引 言

随着汽车占有率的增加,停车难问题日益突显。目前一种新的自动化停车场应运而生。它可以解决停车场使用率低下问题,同时减少司机的停车时间,例如海康威视的泊车机器人系统。自动化停车场利用室内精准定位技术和自动导引车(automated guided vehicle, AGV)技术,由机器人将停放车辆搬运至指定停车位,实现对车辆停放过程的整体优化,最大限度利用停车库资源。

自动化停车场优化问题本质上是车辆路径问题(vehicle routing problem, VRP)。车辆路径问题^[1]是指一定数量的客户,各自有不同数量的货物需求,从配送中心向客户提供货物,由一个车队负责分送货物,并能在一定的约束下实现能耗最少、时间最短等目的。车辆路线问题是重要的组合优化问题,在供应链和物流相关等领域有广泛的应用。由于必须在规定的时间段内完成对申请车辆的停放任务,该问

题属于存在时间窗口的车辆路径问题(vehicle routing problems with time windows, VRPTW)^[2]。针对VRPTW,文献[3,4]提出采用禁忌算法解决多区域、多路径、具有时间限制性的车辆路径问题。文献[5]提出采用混合遗传算法,利用不可行解的惩罚因子设计对移动过程的评估函数,并且在常数时间内完成对交换一定量节点的计算,有效解决大规模客户和服务的问题。

在需求确定的车辆路径问题中,客户数量、需求大小及其时刻都是已知的,并且不会随着任务的进行发生改变,这类经典问题已经得到广泛的研究^[6,7]。在自动化停车场优化问题中,无法提前知道停放车辆的质量、停放时间及其申请时刻等信息。这类问题属于需求随机的车辆路径问题^[8](vehicle routing problem with stochastic demand, VRPSD)。文献[9]提出样本均值近似和蒙特卡洛模拟的方法,从随机样本中求取平均值,得到问题的近似最优解。文献[10]针对车辆路径问题中需求的动态随机特性,阐述了利用期望事件的统计信息解决动态需求

① 国家重点研发计划“智能机器人”重点专项(2018YFB1303900)和浙江工业大学校创新性实验(SYXM1713)资助项目。

② 男,1979年生,博士,讲师;研究方向:工业机器人轨迹规划,工业机器人运动控制等;E-mail: yuxinyinet@163.com

③ 通信作者,E-mail: linlinou@zjut.edu.cn

(收稿日期:2018-06-04)

问题。

自动化停车场优化问题不仅具有需求随机性,而且要求在客户申请时立刻做出决策。在需求随机的条件下,一些通过迭代搜索的优化算法,例如遗传算法^[11]、蚁群算法^[12]、可变邻域搜索算法^[13]等,由于算法复杂度较大难以做出实时决策。并且此类迭代算法适用于求取客户需求已知情况下的最优解,难以适应动态随机的停车优化问题。相对而言,启发式算法利用先验知识和策略做出实时决策,同时保证结果的可行性^[14]。文献[15]使用启发式自适应大领域搜索算法,针对特定的加权有向图,通过不断的添加和移除相距最近、最远或者随机的路线顶点,解决广义旅行商问题。文献[16]利用遗传算法求解问题的适应性,自动设计启发式信息,解决动态随机的车辆路径问题。越来越多的研究者尝试通过启发式算法解决车辆路径问题,这些启发式信息也被称为路径策略^[10]。

目前针对 VRP 的研究相对比较成熟,但是在自动化停车场优化问题方面的研究还很少。文献[17,18]针对立体车库,提出基于遗传算法的优化调度方法,降低了车辆的等待时间以及规划后车辆整体的重心,同时优化了升降机的运行路线。对于库位和停放车辆数较大的情况,遗传算法需要设置较多的群体个体数以求得最优解,会导致算法运行时间过长,无法实时决策。相比于一般的 VRP,停车优化问题的优化目标不局限于路径、时间代价,还包括机器人数量、能耗以及放弃停车数量。能耗代价是搬运距离与停放车辆质量的乘积,即对路径距离代价的加权求和,这部分代价不仅与停车场的布局相关,而且与特定的车辆质量相关。当路线地图以及需求增加时,问题的精确求解变得困难。

本文针对较大规模的自动化停车场以及不断产生停放需求的车辆,建立自动化停车场优化问题的数学模型,并且构造启发式动态规划算法求解此问题。算法不仅可以适应停放车辆信息的随机性,即车辆质量和停放时间服从随机分布,而且能在满足先申请先停放的规则下,对停放车辆的库位安排做出实时决策。在实际应用中,算法能够应对诸如早高峰等集中停车现象,适应停放车辆速率出现较大

波动的情况。

1 问题描述

自动化停车场优化问题可以描述如下:自动化停车场包含一定数量的库位,多个入口和出口。当申请入库时,车辆以相等的概率分配至停车场的其中一个入口,由泊车机器人自动完成停放车辆的搬运工作。申请停放车辆的质量和停放时间的大小值是随机的,并且车辆进入速率具有一定的波动性。停放车辆按申请的先后顺序设定优先级,先申请的先安排停放。

考虑泊车机器人搬运车辆时产生的能耗,其大小与车辆质量和搬运距离成正比。由于停车场中库位空间分布以及车辆质量和停放时间的差异性,导致选择不同的停放策略时产生不同的能耗代价。

自动化停车场优化问题的复杂度随着库位数量和停放车辆数量的增加急剧增大,并且需要在车辆申请入库时做出实时决策。因此,本文拟针对自动化停车场优化问题设计合理有效的停放策略,降低搬运过程中产生的能耗、车辆的等待时间、放弃停车数量以及泊车机器人数量。

2 自动化停车场系统与代价描述

本文利用栅格化地图表示平面自动化停车场的分布状态,描述由多个泊车机器人完成车辆自动化停放的运行规则以及运行过程中产生的代价,具体如下。

2.1 自动化停车场系统

自动化停车场包含 n_E 个入口, n_O 个出口,一定数量的库位以及障碍物,并且以栅格化的地图形式表示各个部分。记基于第 n 个入口描述的自动化停车场中库位的状态为 P_n , 其中包含的库位数为 M , 则 $P_n = \{p_{n,k} \mid k \in [1, M]\}$, $n \in [1, n_E]$, 其中 $p_{n,k}$ 表示 P_n 中第 k 个库位。以库位 $p_{n,k}$ 与相应的入口和最近的出口距离之和 $d_{n,k}$ 作为库位指标,对 P_n 做排序,满足 $d_{n,k} \leq d_{n,k+1}$ 。

当车辆申请出库和入库时,由泊车机器人将相

应车辆搬运至指定位置。泊车机器人 R 数量为 L , 则 $R = \{r_i | i \in [1, L]\}$ 。泊车机器人每次只能搬运一辆车, 搬运车辆时保持匀速运动, 且允许多个泊车机器人出现在同一个栅格中。泊车机器人在空载时的能耗忽略不计; 负载时, 其能耗与搬运车辆的质量和搬运距离成正比。记泊车机器人代价系数为 a , 则机器人总代价 $C_R = a \times L$ 。

对于每辆已经申请停放的车辆 c_i , 其申请入库时刻 t_i 、质量 m_i 、停放时间 T_i 以及申请出库时刻是可知的, 则 $c_i = \{m_i, t_i, T_i\}$ 。可以认为停放车辆的质量, 停放时间, 最大等待时间 T_{Si} 服从均匀分布, 且相互独立, 即 $m_i = U(m_{\min}, m_{\max})$ 、 $T_i = U(T_{\min}, T_{\max})$ 、 $T_{Si} = U(T_{S\min}, T_{S\max})$ 。

当有车辆申请入库时, 按先申请先停放的规则, 为车辆安排库位。若停车场未停满, 并且有泊车机器人空闲, 则需要立即做出决策, 并将车辆搬运入库。一旦车辆停放入库, 则只有到达出库时刻时才能搬动。如果车辆等待的时间超过其最大等待时间, 则该车辆放弃停放; f_{ri} 表示当前车辆是否放弃停车, 若放弃停车, 则 $f_{ri} = 1$ 。

对于所有等待时间不超过其最大等待时间的申请停放的车辆, 构成缓冲队列。当车库未停满时, 考虑到泊车机器人搬起车辆的时间很短并且机器人数量相对充足, 此时, 申请入库的车辆会立即进入车库, 缓冲队列的车辆数为 0。当车库停满时, 申请入库的车辆会排队, 缓冲队列的车辆数会变化。只有车库中的车辆出库后, 缓冲队列中的车辆才能入库, 此时, 库位分配的选择空间非常有限, 缓冲队列的长度及其长度的变化对于库位分配的决策问题影响很小。

2.2 运行代价描述

记泊车机器人搬运能耗 $w_i = k_e \times d_{n,k} \times m_i$, 表示完成车辆 c_i 停放任务产生的能耗, 其中 k_e 为能耗系数。车辆的等待时间 $t_{wi} = t_{in}' - t_{in} + t_{out}' - t_{out}$, 其中 t_{in} 、 t_{out} 分别表示停放车辆申请入库和申请出库的时刻, 其中 $t_{out} = t_i + T_i$; t_{in}' 、 t_{out}' 分别表示停放车辆实际入库和出库的时刻。等待时间代价 $T_{wi} = k_t \times t_{wi}$, 其中 k_t 为时间代价系数。令 k_r 表示放弃停车的代价, 则放弃停车总代价为 $T_{ri} = k_r \times n_r$, 其中 n_r 为

放弃停车数量。

基于上述说明, 统计完成 N 辆车停放产生的总代价 Z , 则目标函数为:

$$\min Z = C_R + T_{ri} + \sum_{i=1}^N (1-f_{ri}) \times (w_i + T_{wi}) \quad (1)$$

$$C_R = a \times L$$

$$w_i = k_e \times d_{n,k} \times m_i \quad i \in [1, N], n \in [1, n_E], k \in [1, M] \quad (2)$$

$$t_{wi} = t_{in}' - t_{in} + t_{out}' - t_{out} \quad (3)$$

$$T_{wi} = k_t \times t_{wi} \quad (4)$$

$$T_{ri} = k_r \times n_r \quad (5)$$

$$m_i = U(m_{\min}, m_{\max}) \quad (6)$$

$$T_i = U(T_{\min}, T_{\max}) \quad (7)$$

$$T_{Si} = U(T_{S\min}, T_{S\max}) \quad (8)$$

$$f_{ri} = \begin{cases} 1 & t_{in}' > t_{in} + T_{Si} \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (9)$$

$$0 \leq t_i \leq t_{i+1} \quad (10)$$

$$d_{n,k} \leq d_{n,k+1} \quad (11)$$

3 车辆停放策略设计

本文采用启发式动态规划算法, 选取停放车辆的质量和停放时间作为决策变量, 根据停放车辆的信息和停车场的停放状态, 确定当前车辆的库位分配。由于停放车辆速率的波动性, 本文基于贪心算法的思想设计动态调整函数, 使算法在进车速率波动较大的情况下仍然做出合理的决策。

3.1 主要因素分析

(1) 车辆质量。泊车机器人的能耗与停放车辆的质量和停放的库位有关, 对于较大规模的停车场和停车数量而言, 其优化复杂度极大。首先考虑单个入口, 并且停放车辆数小于库位数的静态优化问题, 根据式(2)计算 $C_e = \sum_{i=1}^n k_e \times d_k(i) \times m_i$ 。在式(8)的约束下, 利用传统的动态规划算法可以求解该问题的最优解: $C_{\min} = \sum_{i=1}^n k_e \times m_i \times d_{n+1-i}$, 其中 $m_i < m_{i+1}$ 。

分析结果可知, 停放车辆的质量越大, 分配库位

的 d_k 越小,并且停放车辆整体分布在 d_k 较小部分。

(2) 停放时间。车辆的停放时间对能耗的影响比较隐性。当一辆车停放至停车场时,该库位失去了停放车辆的功能,停车场整体的停车效益将会发生变化。以库位的平均搬运距离作为停车效益的指标,以车辆的停放时间作为指标权重,即当停放在第 k 个库位时,则其代价为

$$C(T_i, d_k) = \frac{T_i}{M} \left(\sum_{n=1}^M d_n - d_k \right)$$

在式(8)的约束下,若 $T_i < T_{i+1}$, 则

$$C(T_i, d_k) + C(T_{i+1}, d_{k+1}) \leq C(T_{i+1}, d_k) + C(T_i, d_{k+1})$$

可见,将停放时间较短的车辆安排给 d_k 较小的库位,可以充分利用优质库位减少能耗。

3.2 启发式动态规划算法

动态规划算法将一个复杂的大问题拆分成若干个小问题,通过依次解决各个小问题得到对原问题的最优解^[19]。动态规划算法要求所解决的问题具有完整、准确的模型,由于车辆信息的随机性,无法保证后续决策的最优性,不满足动态规划算法的最优性原理。基于上述问题分析,本文综合车辆的质量和停放时间信息,设计启发式动态规划算法,解决传统动态规划算法无法解决的决策问题。

记 t 时刻停车场中库位的状态 $P_{n,t}$, 停车场中停放车辆状态 $C_{p,t}$, 停车场中停放车辆的状态作为状态变量 $S_{n,t} = s(P_{n,t}, C_{p,t})$ 。

3.2.1 决策函数

当有车辆申请入库时,就进入新的决策阶段。每次决策包含两个部分,是否接受当前车辆的停放;若接受,则如何安排车辆的停放。当停车场中库位已经停放满时,或者当前车辆放弃停车,则延迟或者跳过对当前车辆的决策。当接受车辆停放时,对车辆的质量和停放时间进行归一化,并与库位距离 $d_{n,k}$ 进行匹配,选择合适的停放库位。

首先考虑单个入口的情况,本文构造了满足每个库位上的车辆总停放时间相等的情况下停放时间的归一化形式,从而充分利用所有库位合理停放车辆,具体过程如下:

对于包含 M 个库位和 N 辆车的系统,车辆按停放时间从小到大排序,则每个库位上车辆总停放时

间为:

$$\int_{x_n}^{x_{n+1}} (kx + t_{\min}) dx = T, \quad n \in [1, M] \quad (9)$$

$$k = \frac{t_{\max} - t_{\min}}{N} \quad (10)$$

$$T = \frac{N(t_{\max} + t_{\min})}{2M} \quad (11)$$

求解式(9),可得:

$$\frac{k}{2} (x_{n+1}^2 - x_n^2) + t_{\min} (x_{n+1} - x_n) = T \quad (12)$$

令 $x_1 = 0$, $\left(\frac{\sqrt{k}}{2} x_n + \frac{t_{\min}}{\sqrt{2k}} \right)^2 = b_n$, 代入式(12),则

$$b_{n+1} = nT + \frac{t_{\min}^2}{2k}$$

$$\text{即 } \frac{\sqrt{k}}{2} x_{n+1} = \sqrt{nT + \frac{t_{\min}^2}{2k}} + \frac{t_{\min}}{\sqrt{2k}}$$

令 $x_{n+1} - x_n = p_n$ 表示第 n 个库位停放的车辆数,则

$$p_n = \frac{\sqrt{2}}{k} \left(\sqrt{nT + \frac{t_{\min}^2}{2k}} - \sqrt{(n-1)T + \frac{t_{\min}^2}{2k}} \right) \quad (13)$$

令 $t_{\max}^2 - t_{\min}^2 = c$, $t_{\min}^2 = d$, 并将式(10)、(11)代入式(13)可得:

$$p_n = \frac{N}{t_{\max} - t_{\min}} \left(\sqrt{\frac{n}{M}c + d} - \sqrt{\frac{n-1}{M}c + d} \right)$$

令 $\frac{p_n}{N} = p(n)$ 表示每个库位停放车辆数的概率

密度,满足每个库位停放车辆总时间相等,则:

$$p(n) = \frac{1}{t_{\max} - t_{\min}} \left(\sqrt{\frac{n}{M}c + d} - \sqrt{\frac{n-1}{M}c + d} \right) \quad (14)$$

由于车辆的停放时间服从均匀分布,需要对其分布做变换并且归一化,使其满足 $p(n)$ 的分布。式(14)等价于

$$p(n) = \frac{1}{t_{\max} - t_{\min}} \int d \sqrt{cx + d}, \quad x \in \left(\frac{n-1}{M}, \frac{n}{M} \right]$$

$$\text{由于 } \sum_{n=1}^N p(n) = \int_0^1 \frac{1}{t_{\max} - t_{\min}} d(\sqrt{cx + d}) = 1,$$

可见 $\sqrt{cx + d} = U(t_{\min}, t_{\max})$, 根据式(6)的约束,令 $\sqrt{cx + d} = T_i$, 则:

$$x = \frac{T_i^2 - t_{\min}^2}{t_{\max}^2 - t_{\min}^2} \in [0,1] \tag{15}$$

根据对主要因素的分析,综合车辆的质量和停车时间信息,建立启发式动态规划算法的决策函数 $p_{n,k} = \pi(c_i)$ 。构造 $c_i \rightarrow d_{n,k}$ 将车辆信息与库位指标相对应,令 $\sigma(x_i) = (d_{n,\max} - d_{n,\min})x_i + d_{n,\min}$, $x_i \in [0,1]$, 根据式(5)和(15),对车辆的质量和停放时间做归一化处理,即:

$$x_{mi} = \frac{m_{\max} - m_i}{m_{\max} - m_{\min}}, x_{Ti} = \frac{T_i^2 - T_{\min}^2}{T_{\max}^2 - T_{\min}^2}$$

令 $x_i = \alpha \times x_{mi} + (1 - \alpha) \times x_{Ti}$, ($0 < \alpha < 1$), 则 $\hat{x}_i = \sigma(x_i)$ 。

通过 $\hat{x}_i$ 与 $d_{n,k}$ 的匹配,在所有空闲的库位中选择当前车辆的合适库位,即 $k = \operatorname{argmin}_k (|\hat{x}_i - d_{n,k}|)$ 。

3.2.2 动态调整

决策函数 $p_{n,k} = \pi(c_i)$ 在分配库位时总是利用所有库位做决策,然而由于车辆速率的波动性,停车场中的停放车辆可能处于不饱和状态。在不饱和状态下,上述决策函数仍然倾向于按指标匹配做出决策,从而造成优质库位的浪费。针对上述问题,贪心算法能够充分利用 $d_{n,k}$ 较小的优质库位。

本文基于贪心算法设计动态调整策略,在决策函数 $p_{n,k} = \pi(c_i)$ 的基础上,根据停车场的状态调整决策结果。对于给定的停放车辆数据集,使所有车辆从第 n 个入口进入,并将其余入口作为障碍物。首先采用贪心算法作为决策函数,即车辆优先停放在 $d_{n,k}$ 较小的车位,模拟整个停放过程。其次,统计当前库位状态 P_n 下,各个库位停放的车辆数 $n(p_{n,k})$,选取第 k_{equ}^n 个库位作为分界线,使 k_{equ}^n 以下库位停放车辆总和与 k_{equ}^n 以上库位停放车辆总和最接近,即:

$$k_{equ}^n = \operatorname{argmin}_k (|\sum_{j=1}^k n(p_{n,j},t) - \sum_{j=k+1}^M n(p_{n,j},t)|)$$

定义 $\Delta n = \sum_{j=1}^{k_{equ}^n} n(p_{n,j},t) - \sum_{j=k_{equ}^n+1}^M n(p_{n,j},t)$ 为 t 时刻上下两部分车库已经停放车辆数之差。记 β 为动态调整系数, $\beta(P_{n,t}) = \frac{2}{1 + e^{-\Delta n/k_n}}$ 。最后,根据车库中车辆的停放状态计算 β 实时调整决策函数的结果。由于从不同入口进入的车辆共享同一个车库,

不同的库位状态之间存在竞争关系。因此,当停放车辆进入库位时,更新所有库位状态下的 Δn 。与贪心算法相比,经过调整的启发式动态规划算法进一步提高了优质库位的利用率。

通过上述计算过程,可以得到所有库位状态对应的 k_{equ}^n , 记 $x = (k_{equ}^1, k_{equ}^2, \dots, k_{equ}^{n_E})$ 。对于给定的车辆数据集,运行总代价 Z 可以表示为 $Z(x)$ 。将上述计算结果 x 的附近区域内求得 x^* , 使 $Z(x^*)$ 最小。通过多组车辆数据集的计算结果,计算 x^* 的平均值,将其作为各个库位状态下的最优分界点。经过动态调整的决策函数 $\hat{x}_i = \beta(P_{n,t}) \times \sigma(c_i)$, 即 $p_{n,k} = \pi(S_{n,t}, c_i)$ 。

3.2.3 代价函数

根据式(3)、(4)、(7),对于每次决策产生的代价 $V(c_i) = (1 - f_{ri}) \times (T_{wi} + w_i) + f_{ri} \times T_{ri}$, 式(1)中完成 N 辆车停放产生的总代价等价于 $Z = C_R + \sum_{i=1}^N V(c_i)$ 。

3.2.4 递推公式

利用决策变量设计决策函数,同时根据停车场的停放状态实时调整决策函数的结果,依据传统动态规划的基本原理得到启发式动态规划算法的递推公式。在停车场存在空位,泊车机器人空闲并且当前车辆没有放弃停车时,根据停车场的状态以及车辆信息,由决策函数 $p_{n,k} = \pi(S_{n,t}, c_i)$ 计算相应库位。当泊车机器人将车辆搬运入库时,更新停车场状态以及停车场中车辆状态,即 $P_{n,t+1} = P(P_{n,t}, p_{n,k})$ 、 $C_{P_{t+1}} = C_P(C_{P_t}, c_i)$, 则自动化停车场运行机制为 $S_{n,t+1} = s(P_{n,t+1}, C_{P_{t+1}}) = \varphi(S_{n,t}, c_i)$ 。

3.3 算法步骤

自动化停车场调度方法以启发式动态规划算法作为决策函数,对每个停放车辆安排合理的库位,从而降低整体运行的代价,其运行机制如下所示。

算法初始化部分:

步骤1 设置车辆质量 ($m_{\min}, m_{\max}$), 停放时间 ($T_{\min}, T_{\max}$), 最大等待时间 ($T_{S\min}, T_{S\max}$) 的范围, 初始化车辆数据集,并且车辆申请速率具有波动性。

步骤2 在泊车机器人数量充足的情况下,针对给定的车辆数据集,利用贪心算法分别计算各个库位状态 P_n 下 k_{equ}^n 的初始解。通过多组车辆数据集,

在初始解的附近区域计算 k_{equ}^n 的平均值作为其最优解。

步骤3 在各个入口处设置数量相等的泊车机器人,通过多次迭代计算寻找泊车机器人数量的最优值。

算法运行部分:

步骤1 执行算法初始化部分,设置时间 $t = 1$ 。

步骤2 对于申请的车辆,以相等的概率分配至停车场的其中一个入口。若当前时刻有车辆申请入库,并且停车场未满载,入口处存在空闲机器人,则转步骤3,否则,当前车辆进入缓冲队列等待。

步骤3 对于即将入库的车辆,根据当前车辆的质量、停放时间信息以及车库停放状态,利用决策函数 $p_{n,k} = \pi(S_{n,t}, c_i)$ 为其分配合适库位,由泊车机器人将其搬运至指定库位,并更新所有库位状态 $P_{n,t}$ 。

步骤4 提前一定时间判断是否有车辆出库,若有车辆即将出库,则选择与车辆库位距离最近的空闲泊车机器人前往完成搬运工作。若无空闲的泊车机器人,则出库车辆进行等待。

步骤5 判断是否完成所有车辆的入库和出库任务,若已完成,则算法结束,否则 $t = t + 1$,跳转步骤2。

4 实验仿真

4.1 车辆数据与参数设置

仿真实验中,自动化停车场的地图如图1所示,其中白色栅格表示库位,灰色表示道路,黑色表示障碍物, E 表示入口, O 表示出口,其中包含300个库位。在初始和没有搬运任务时,泊车机器人在停车场入口处等待。车辆总数为2000,车辆的质量范围 $[10 \times 100 \text{ kg}, 40 \times 100 \text{ kg}]$,停放时间范围 $[2 \times 10^3 \text{ s}, 20 \times 10^3 \text{ s}]$,最大等待时间范围 $[300 \text{ s}, 1200 \text{ s}]$ 。为了模拟停车速率的波动性,设置了两档停车速率交替进行,车辆数与申请时刻的关系如图2所示。若停车场足够大,则停车场中的车辆数如图3所示。

设置决策函数中参数 $\alpha = 0.5$, 代价权重 $k_i = 4$, $k_e = 1$, $k_r = 1200$, $a = 50000$, 基于贪心算法计算库位划分界限 $k_{equ}^1 = 135$, $k_{equ}^2 = 135$ 。取 $k_n =$

400, 通过最速下降法计算 k_{equ}^1, k_{equ}^2 最优解的平均值 $k_{equ}^1 = 140$, $k_{equ}^2 = 120$, k_{equ}^1, k_{equ}^2 值与运行总代价之间的关系如图4所示。

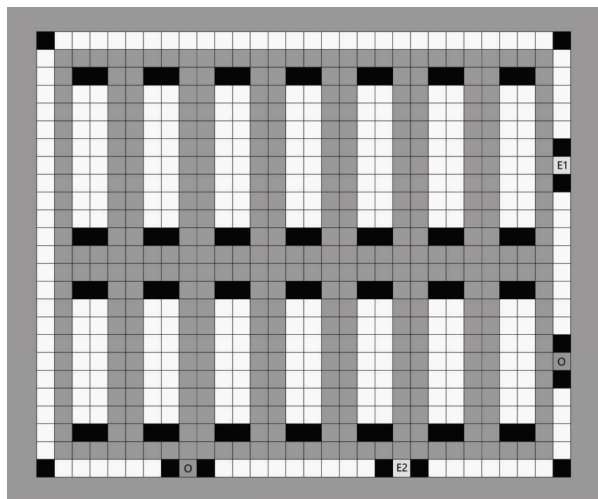


图1 自动化停车场分布结构

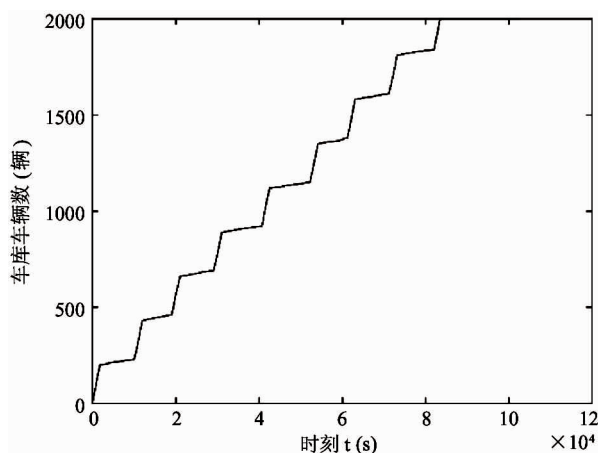


图2 车辆数与申请时刻的关系

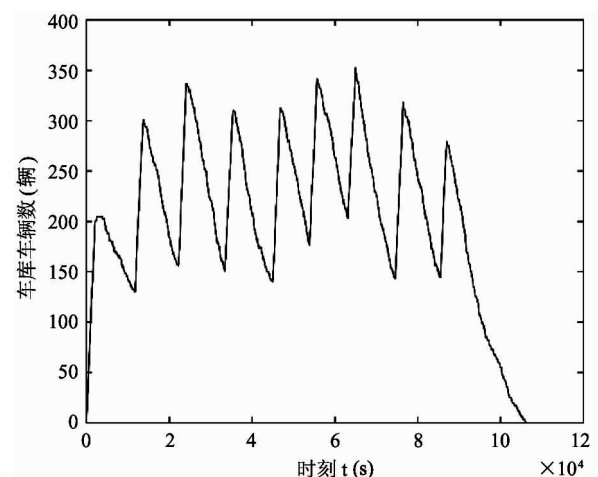


图3 停车场中车辆数

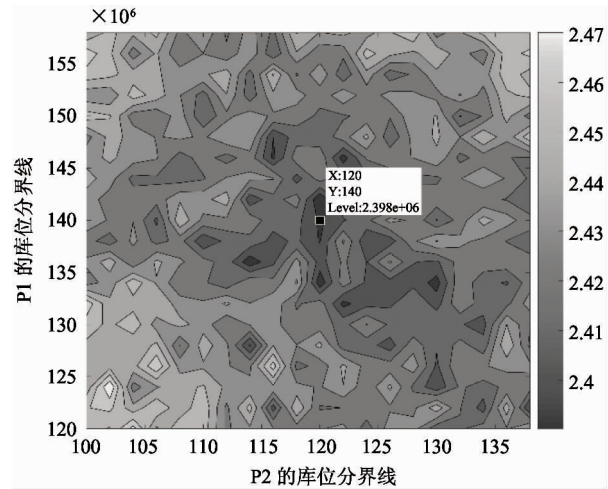


图 4 库位分界线与运行总代价的关系

4.2 机器人数量选取

在停车场优化问题中,针对给定的车辆信息,测试不同数量机器人的优化结果。机器人数量与总代价的关系如图 5 所示,其数据如表 1 所示,其中 $k_{equ}^1 = 140$, $k_{equ}^2 = 120$ 。根据运行结果可知,当机器人数量较小时,由于车辆的等待时间和放弃停车数量增加,导致运行的总代价急剧增大;当机器人数量较大时,存在机器人一直处于空闲状态。由图 5 可知,最优的机器人数量为 8。

4.3 实验结果

在上述车辆数据以及参数设置的基础上,通过 10 次重复性的实验,每次实验包含 7 组数据,每组实验包含泊车机器人代价、能耗代价、等待时间代

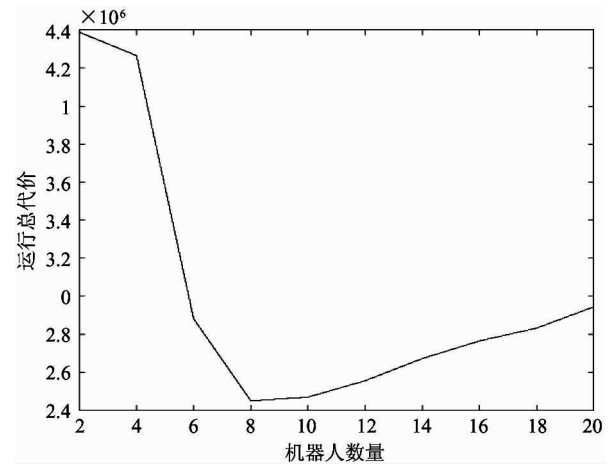


图 5 机器人数量与总代价的关系

表 1 机器人数量与总代价的关系

Case	机器人数量	总代价
1	2	4388238
2	4	4265520
3	6	2880878
4	8	2449644
5	10	2468653
6	12	2554846
7	14	2671558
8	16	2764144
9	18	2831800
10	20	2943595

价、放弃停车代价。第 1、2、3 组分别是质量,停车时间和两者组合作为调度策略的优化结果。第 4、5、6 组是 1、2、3 组动态调整后的优化结果。第 7 组是贪心算法的优化结果。10 次实验的运行结果如图 6 所示,其中 1 次实验的详细数据见表 2。

4.4 结果分析

本实验计算了贪心算法和不同调度策略作为决策函数时的优化结果。从实验结果可以看出,启发式动态规划算法与贪心算法相比能够较大地降低总代价。对比不同的调度策略,组合式调度策略在原有的基础上进一步降低运行总代价。与贪心算法相比,经过调整的启发式动态规划算法减少总代价的百分比如表 3 所示。

从实验结果可知,动态调整对不同的调度策略的作用有所差异。对于质量信息而言,由于动态调整参数设置不合适,破坏了原本有序的结构,动态调整反而增加了总代价。对于停放时间信息和组合信息而言,动态调整能够进一步减少总代价。

针对实验中的车辆数据以及进车速率,通过选取合适的机器人数量和动态调整的参数构造调度策略。在 Matlab 平台上,完成整个仿真实验的平均时间为 43.7 s,对于每辆车计算相应停放车位的平均用时为 22 ms。与车辆的到达速率相比,本文提出的算法能够实时决策,并且能够应对进车速率波动较大的情况。

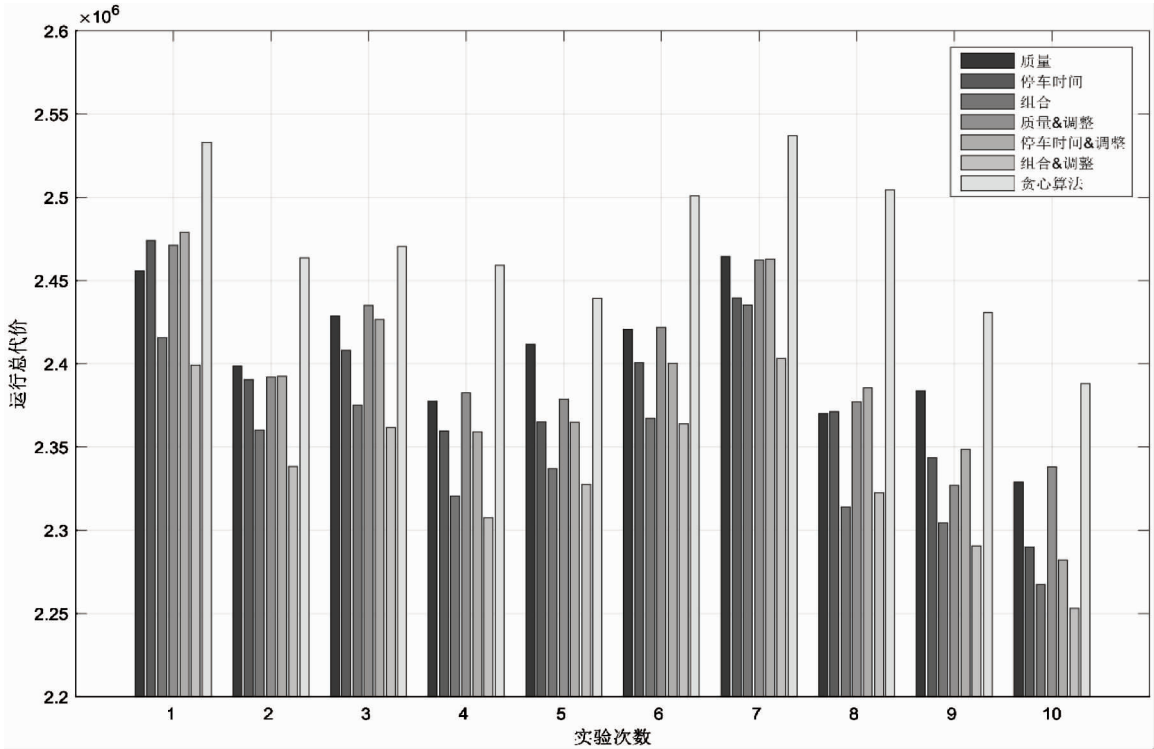


图 6 不同策略的运行总代价

表 2 实验结果的详细数据

Case	C_R	w	T_w	T_r	Z
1	400 000	1 605 924	355 088	94 800	2 455 812
2	400 000	1 618 867	366 456	88 800	2 474 124
3	400 000	1 565 299	363 884	86 400	2 415 583
4	400 000	1 618 448	362 672	90 000	2 471 120
5	400 000	1 621 136	373 968	84 000	2 479 104
6	400 000	1 563 523	344 320	91 200	2 388 043
7	400 000	1 699 281	340 012	93 600	2 532 893

表 3 启发式动态规划相对于贪心算法减少的总代价的比重

Case	1	2	3	4	5
比重(%)	5.28	5.09	4.40	6.16	5.57
Case	6	7	8	9	10
比重(%)	5.48	5.28	7.26	5.77	5.65

5 结 论

对于大规模自动化停车场中车辆的库位安排问

题,本文提出一种启发式动态规划算法解决具有需求随机性以及决策实时性的优化问题,降低停放过程中产生的搬运能耗、车辆等待时间等代价。本文对车辆的质量和停放时间构建归一化函数,通过两者信息的组合评价车辆与库位的匹配度,从而建立库位安排的实时决策函数。针对进车速率波动性较大的问题,以及由于停车场中车辆数不饱和和导致的分散停放问题,提出基于贪心思想的动态调整策略,充分利用停车场的优质库位。

与具有局部搜索能力的算法相比,例如遗传算

法和禁忌算法等,启发式动态规划算法可以解决算法的实时性问题,但是不能保证策略的最优性。针对特定的车辆数据,将基于启发式动态规划算法的停放策略作为具有局部搜索能力算法的初始解,可以降低遗传算法等的计算量。

参考文献

- [1] Golden B L, Raghavan S, Wasil E A. The vehicle routing problem: latest advances and new challenges[J]. *Springer Science & Business Media*, 2008, 43:3-12
- [2] Braysy O, Gendreau M. Vehicle routing problem with time windows, part i: route construction and local search algorithms[J]. *Transportation Science*, 2005, 39(1): 104-118
- [3] Nguyen P K, Crainic T G, Toulouse M. A tabu search for time-dependent multi-zone multi-trip vehicle routing problem with time windows[J]. *European Journal of Operational Research*, 2013, 231(1): 43-56
- [4] Belhaiza S, Hansen P, Laporte G. A hybrid variable neighborhood tabu search heuristic for the vehicle routing problem with multiple timewindows[J]. *Computers & Operations Research*, 2014, 52: 269-281
- [5] Vidal T, Crainic T G, Gendreau M, et al. A hybrid genetic algorithm with adaptive diversity management for a large class of vehicle routing problems with time-windows[J]. *Computers & Operations Research*, 2013, 40(1): 475-489
- [6] Laporte G. What you should know about the vehicle routing problem[J]. *Naval Research Logistics*, 2007, 54(8): 811-819
- [7] Laporte G. Fifty years of vehicle routing[J]. *Transportation Science*, 2009, 43(4): 408-416
- [8] Gendreau M, Laporte G, Séguin R. Stochastic vehicle routing[J]. *European Journal of Operational Research*, 1996, 88(1): 3-12
- [9] Verweij B, Ahmed S, Kleywegt A, et al. The sample average approximation method applied to stochastic routing problems: a computational study[J]. *Computational Optimization and Applications*, 2003, 24(2): 289-333
- [10] Ritzinger U, Puchinger J, Hartl R F. A survey on dynamic and stochastic vehicle routing problems[J]. *International Journal of Production Research*, 2016, 54(1): 215-231
- [11] Prins C. A simple and effective evolutionary algorithm for the vehicle routing problem[J]. *Computers & Operations Research*, 2004, 31(12): 1985-2002
- [12] Yu B, Yang Z Z, Yao B. An improved ant colony optimization for vehicle routing problem[J]. *European Journal of Operational Research*, 2009, 196(1): 171-176
- [13] Kytojoki J, Nuortio T, Braysy O, et al. An efficient variable neighborhood search heuristic for very large scale vehicle routing problems[J]. *Computers & Operations Research*, 2007, 34(9): 2743-2757
- [14] Laporte G, Gendreau M, Potvin J Y, et al. Classical and modern heuristics for the vehicle routing problem[J]. *International transactions in operational research*, 2000, 7(4): 285-300
- [15] Smith S L, Frank I. GLNS: an effective large neighborhood search heuristic for the generalized traveling salesman problem[J]. *Computers & Operations Research*, 2017, 87: 1-19
- [16] Josiah J G, Mei Y, Chen G, et al. Evolving heuristics for dynamic vehicle routing with time windows using genetic programming[C]. In: *Proceedings of 2017 IEEE Congress on Evolutionary Computation*, San Sebastián, Spain, 2017. 5-8
- [17] 折贝. 自动化立体车库调度优化研究[D]. 西安:陕西科技大学机电工程学院, 2017. 17-36
- [18] 梁英. 自动化立体车库排队模型及调度优化研究[D]. 兰州:兰州交通大学交通运输学院, 2017. 19-28
- [19] Bellman R E. *Dynamic Programming*. Princeton[M]. NJ: Princeton University Press, 1957

A scheduling method of automatic parking lot based on heuristic dynamic programming

Yu Xinyi, Lu Liang, Zhu Yichen, Ou Linlin

(College of Information Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310000)

Abstract

Based on heuristic dynamic programming, a scheduling method for automatic parking lot is proposed to reduce the cost generated in the running process, such as energy consumption, waiting time of vehicles. The information of mass and waiting time is constructed separately into the normalized function to evaluate the matching degree of vehicles and parking spaces, which can arrange all parking spaces in the parking lot. The strategy based on greedy algorithm is proposed to solve the unsaturation problem of parking vehicles in parking lot. The proposed strategy adjusts the calculation results of evaluation function dynamically according to the segmentation of parking lot and the state feedback, which can improve the arrangement further. The experiments compare the greedy algorithm with the proposed algorithms which respectively use mass, waiting time and combination of them as the decision functions. The experiment results show that the proposed heuristic dynamic programming method can make real-time decision with large fluctuations in rate and reduce the cost generated in the running process.

Key words: vehicle routing, heuristic, dynamic programming, real-time decision making, automation