【交通物流 / Transportation Logistics】

平面移动式立体车库客流状态聚类研究

贺云鹏, 李建国

兰州交通大学自动化与电气工程学院, 甘肃兰州 730070

摘要: 对平面移动式立体车库客流状态进行聚类有助于获知车库客流信息, 指导存取车设备调度优化, 提高立体车库的运行效率. 提出一种平面移动式立体车库客流状态聚类方法, 建立立体车库设备运行时间模型, 模拟运行得到不同顾客到达率下的运行参数, 对客流模式进行划分并作为初始聚类输入条件, 在此基础上使用模糊 c 均值算法完成对车库客流数据的聚类. 以中国西安市某立体车库为研究对象, 对其上位机数据库的顾客到达数据进行分析与聚类, 定义内部评价指标和相对评价指标, 并与其他聚类算法进行对比. 实验结果表明, 模糊 c 均值聚类算法实现了立体车库客流状态聚类, 且聚类结果可靠、合理地反映出立体车库客流实际情况.

关键词: 交通运输工程; 立体车库; 客流状态; 模糊聚类算法; 顾客到达; 服务时间

中图分类号: U491.7

文献标志码: A

doi: 10.3724/SP.J.1249.2020.03314

Passenger flow state clustering in flat mobile automated garage

HE Yunpeng and LI Jianguo

School of Automation and Electrical Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, Gansu Province, P. R. China

Abstract: Clustering the flat mobile automated garage passenger flow state can help to obtain the passenger flow information, guide the scheduling optimization and improve the operating efficiency. This paper proposes a method to cluster the passenger flow in flat mobile automated garage. Firstly, we establish the travel time model for the automated garage. After getting simulated operational indicator under different arrival rates, we obtain the passenger flow pattern divisions as clustering input criteria, and use the fuzzy c -means (FCM) algorithm to cluster the garage passenger flow data. Finally, we take an automated garage in Xi'an, China as an example, and obtain the customer arrival data from its upper computer database, define the external evaluation index and relative evaluation index to compare with other clustering algorithms. The experimental results show that the fuzzy c -means clustering algorithm realizes the passenger flow status clustering of stereo garage, and the clustering results reflect the actual passenger flow situation reliably and reasonably.

Key words: transport engineering; automated garage; passenger flow state; fuzzy c -means (FCM) algorithm; passenger arrival; service time

Received: 2019-07-01; Accepted: 2019-10-26

Foundation: Construction Science and Technology Research Project of Gansu Province (JK2016-10)

Corresponding author: Associate professor LI Jianguo. E-mail: 394504676@qq.com

Citation: HE Yunpeng, LI Jianguo. Passenger flow state clustering in flat mobile automated garage [J]. Journal of Shenzhen University Science and Engineering, 2020, 37(3): 314-322. (in Chinese)

<http://journal.szu.edu.cn>

随着城市发展与机动车数目的增长, 城市停车问题越发突出, 相比于平面式停车场, 自动化立体车库^[1]增加了土地利用效率, 有助于缓解城市停车难问题. 立体车库客流状态指车库顾客的到达特征. 通过对立体车库客流状态进行聚类, 进而指导立体车库的管理和存取设备的调度, 有助于提高立体车库运行效率, 增加顾客满意度.

目前业界针对停车场客流状态的研究已取得一些成果. 冉江宇等^[2]对平面式停车场客流状态进行聚类研究, 聚类依据为顾客到达率与到达分布特征. 但对于立体车库, 顾客到达情况会对存取设备调度产生影响, 进而影响车库运行效率, 因此, 在对立体车库客流状态进行聚类研究时, 还需分析客流状态与车库运行状态的关系. 华文瀚等^[3]提出根据立体车库不同客流到达情况, 选择不同调度策略以提高存取效率的思想, 但在划分客流状态时, 仅依据当前顾客到达所处时间段. 在文献^[3]基础上, 刘美菊等^[4]设计基于随机森林的立体车库运行模式识别方法, 依据存取设备位置 and 状态对不同客流模式进行划分. 但不同车库设备位置 and 状态与客流到达情况关系不同, 所提出方法的适用性不足, 因此, CHERIAN 等^[5]设计 ParkGauge 系统, 基于传感器和顾客智能手机信息对立体车库客流信息进行提取, 进而识别车库拥堵状况, 但该研究依据经验对车库拥堵情况进行等级划分, 缺乏具体分析.

以上文献对车库客流进行研究时, 多直接根据时间和经验直觉划分, 缺乏对车库客流特性进行聚类研究, 并缺乏对客流状态与车库运行特征关系的分析. 为指导立体车库管理和调度, 分析立体车库客流与运行状态的规律, 本研究构建立体车库存取车服务时间模型, 模拟得到不同到达率下的车库运行指标, 对立体车库客流状态进行划分, 以此作为输入条件, 使用模糊 c 均值 (fuzzy c -means, FCM) 算法完成立体车库客流的聚类, 通过聚类评价指标验证其聚类合理性, 准确全面地反映立体车库客流特征, 指导车库设备调度优化.

1 立体车库客流状态划分

1.1 顾客到达率定义

通常将交通状态分为短期、中期及长期 3 类^[6], 本研究分析立体车库短期客流状态. 传统短期交通流研究对象多为固定 15 min 内的顾客到达人数或车流量^[7]. 对于立体车库, 顾客到达率与城市

道路等交通密集场所相比相对较低, 若划分时间较短, 到达率变化波动过大, 不利于指导调度和管理. 参照文献^[8], 本研究定义顾客到达时间间隔范围为 30 min, 则顾客到达率为

$$\alpha = \frac{60 \times N}{\sum_{i=1}^N (t_i - t_{i-1})} \quad (1)$$

其中, α 为单位时间 (30 min) 内的存取车顾客到达率 (单位: 辆/h); N 为该时段内到达的顾客总数量; t_i 和 t_{i-1} 分别为本次顾客和上一顾客的到达时刻 (单位: min).

1.2 平面移动式立体车库运行模型

自动化立体车库分为 9 大类^[9], 其中, 平面移动类自动化程度高且最适合大型化发展, 但其存取车时间较长, 运行效率低. 平面移动式立体车库模型如图 1, 车库结构为 p 层 q 列, 车厅 (I/O 口) 用于进出车辆, 搬运台车 (RGV) 用于装载车辆在每层的巷道上进行水平运动, 升降机用于装载车辆和搬运台车进行跨层运动. 立体车库结构会对车库运行和客流状态产生影响, 建立三维坐标系对车库进行描述, 使模型适用于不同结构的立体车库.

图1 立体车库结构模型

Fig. 1 Automated garage structure model

为指导立体车库设备调度, 需要研究立体车库客流模式与车库运行的关系. 立体车库实际运行过程中顾客到达率不断实时变化, 车库运行受到一段时间内顾客存取车到达率变化的影响, 因此, 需要研究立体车库设备的存取过程, 得到长时间固定到达率的车库运行指标, 分析到达率与车库运行指标的关系, 将此设为聚类初始条件之一, 指导客流模式的聚类划分和车库设备调度.

对车库运行状态进行评价时, 主要考虑顾客的

排队等待特征和设备存取的服务时间特征. 顾客平均排队队长 L 定义为顾客到达车库时, 等待队列中的顾客数目,

$$L = \frac{\sum_{j=1}^J (A_j + B_j) + \sum_{k=1}^K (A_k + B_k)}{J + K} \quad (2)$$

其中, J 为单位时间总存车操作数; K 为单位时间总取车操作数; 第 j ($j = 1, 2, \dots, J$) 个存车用户到达车库时, 等待队列中有 A_j 个待存车用户及 B_j 个待取车用户; 第 k ($k = 1, 2, \dots, K$) 个到达车库时等待队列中, 有 A_k 个待存车用户及 B_k 个待取车用户.

平均存取车服务时间 T_{serve} 定义为库内存取车设

备服务车辆完成 1 次存或取操作的平均时间,

$$T_{\text{serve}} = \frac{\sum_{j=1}^J T_{Sj} + \sum_{k=1}^K T_{Rk}}{J + K} \quad (3)$$

其中, T_{Sj} 为第 j 个存车用户车辆接受服务时长; T_{Rk} 为第 k 个取车用户车辆接受服务时长.

平均总等待时间 T_{wait} 定义为顾客由到达至存取车完成离开的平均时间. 对于存车顾客, 顾客将车辆放入车厅即离开, 等待总时间不包含服务时间; 对于取车顾客, 设备将车辆送至车厅后, 顾客开车离开, 包含设备服务时间. 其表达式为

$$T_{\text{wait}} = \frac{\sum_{j=1}^J \left(\sum_{j_1=j-A_j}^{j-1} T_{Sj_1} + \sum_{k_1=k'-B_j}^{k'-1} T_{Rk_1} \right) + \sum_{k=1}^K \left(T_{Rk} + \sum_{j_2=j'-A_k}^{j'-1} T_{Sj_2} + \sum_{k_2=k-B_j}^{k-1} T_{Rk_2} \right)}{J + K} \quad (4)$$

其中, k' 为第 j 个存车用户车到达车库时等待队列中最后一个取车用户编号; j' 为第 k 个取车用户到达车库时等待队列中最后一个存车用户编号; T_{Sj_1} 和 T_{Sj_2} 分别为第 j_1 和 j_2 个存车用户接受服务时长; T_{Rk_1} 和 T_{Rk_2} 分别为第 k_1 和 k_2 个取车用户接受服务时长.

立体车库 RGV 进行存取车服务时位置状态图如图 2. 其中, $P_1 \sim P_9$ 表示 RGV 进行存取车操作时进行位置移动的过程. 可见, 立体车库存取车服务时间受到 RGV 初始位置、I/O 口位置、升降机位置及目标车位位置等多种因素影响. 对评价指标进行求解时需分析立体车库存取车动作特征.

图 2 RGV 位置状态

Fig. 2 RGV position status diagram

存取车服务时间模型中参数符号的定义如表 1. 以下建立每种位置关系下的存取车服务时间表达式.

表 1 服务时间模型参数符号

Table 1 Service time model parameter symbols

参数	描述
t_{RGVstart}	RGV 启动时间
t_{RGVi}	RGV 横向运动一个车位的时间
$t_{\text{RGVextend}}$	RGV 伸入车位进行存取车的时间
t_{lifstart}	升降机启动时间
t_{lifk}	升降机竖直运动一个车位的时间
$(x_{\text{initial}}, z_{\text{initial}})$	RGV 初始位置坐标
$(x_{\text{st}}, z_{\text{st}})$	存车车位坐标
$(x_{\text{re}}, z_{\text{re}})$	取车车位坐标
$(x_{\text{I/O}}, z_{\text{I/O}})$	I/O 口坐标
x_{lift}	升降机横坐标
$\text{POS}_{\text{initial}}$	RGV 初始位置
$\text{POS}_{\text{I/O}}$	I/O 口位置
POS_{st}	存车车位位置
POS_{re}	取车车位位置

依据 I/O 口位置、RGV 初始位置及存车车位位置的不同关系, 存车操作分为如表 2 所示的 6 种情况, 各情况下的存车服务时间计算方法如下.

表2 存车情况分类
Table 2 Classification of vehicle storage

类别	位置关系		路径及服务时间	
	L/O 位置和 RGV 初始位置关系	L/O 位置和车位位置关系	RGV 存车动作路径	RGV 存车服务时间表达式
1	$POS_{initial} = POS_{L/O}$	$z_{st} = z_{L/O}$	P_1	式(5)
2	$POS_{initial} = POS_{L/O}$	$z_{st} \neq z_{L/O}$	P_2-P_5	式(6)
3	$POS_{initial} \neq POS_{L/O}, z_{initial} = z_{L/O}$	$z_{st} = z_{L/O}$	P_3-P_9	式(7)
4	$POS_{initial} \neq POS_{L/O}, z_{initial} = z_{L/O}$	$z_{st} \neq z_{L/O}$	$P_3-P_4-P_5$	式(8)
5	$POS_{initial} \neq POS_{L/O}, z_{initial} \neq z_{L/O}$	$z_{st} = z_{L/O}$	$P_2-P_6-P_9$	式(9)
6	$POS_{initial} \neq POS_{L/O}, z_{initial} \neq z_{L/O}$	$z_{st} \neq z_{L/O}$	$P_2-P_6-P_4-P$	式(10)

$$T_{serve} = 2t_{RGVstart} + |x_{st} - x_{L/O}| \times t_{RGVi} + t_{RGVextend} \quad (5)$$

$$T_{serve} = 3t_{RGVstart} + t_{liftstart} + (|x_{lift} - x_{L/O}| + |x_{lift} - x_{st}|) \times t_{RGVi} + |z_{lift} - z_{L/O}| \times t_{liftk} + t_{RGVextend} \quad (6)$$

$$T_{serve} = 2t_{RGVstart} + (|x_{initial} - x_{L/O}| + |x_{L/O} - x_{st}|) \times t_{RGVi} + 2t_{RGVextend} \quad (7)$$

$$T_{serve} = 3t_{RGVstart} + t_{liftstart} + (|x_{initial} - x_{L/O}| + |x_{lift} - x_{L/O}| + |x_{lift} - x_{st}|) \times t_{RGVi} + |z_{st} - z_{L/O}| \times t_{liftk} + 2t_{RGVextend} \quad (8)$$

$$T_{serve} = 3t_{RGVstart} + t_{liftstart} + (|x_{initial} - x_{lift}| + |x_{lift} - x_{L/O}| + |x_{L/O} - x_{st}|) \times t_{RGVi} + |z_{initial} - z_{L/O}| \times t_{liftk} + 2t_{RGVextend} \quad (9)$$

$$T_{serve} = 4t_{RGVstart} + 2t_{liftstart} + (|x_{initial} - x_{lift}| + |x_{L/O} - x_{lift}| + |x_{st} - x_{lift}|) \times t_{RGVi} + (|z_{initial} - z_{L/O}| + |z_{st} - z_{L/O}|) \times t_{liftk} + 2t_{RGVextend} \quad (10)$$

由于取车操作与存车操作相比, 其动作顺序和动作特征不同, 因此, 需要重新对取车情况进行分类. 依据 L/O 口位置、RGV 初始位置及取车车位的

不同位置关系, 分为如表3所示的4种情况, 各情况下的取车服务时间计算方法如下.

表3 取车情况分类
Table 3 Classification of vehicle retrieval

类别	位置关系		路径及服务时间	
	车位位置和 RGV 初始位置关系	L/O 口和车位位置关系	RGV 取车动作路径	RGV 取车服务时间表达式
1	$POS_{initial} = POS_{re}$	$z_{st} = z_{L/O}$	P_1-P_8	式(11)
2	$POS_{initial} = POS_{L/O}$	$z_{st} \neq z_{L/O}$	$P_1-P_7-P_6$	式(12)
3	$POS_{initial} \neq POS_{re}$	$z_{st} = z_{L/O}$	$P_2-P_5-P_8$	式(13)
4	$POS_{initial} \neq POS_{re}$	$z_{st} \neq z_{L/O}$	$P_2-P_5-P_7-P_6$	式(14)

$$T_{serve} = 2t_{RGVstart} + (|x_{initial} - x_{re}| + |x_{L/O} - x_{re}|) \times t_{RGVi} + 2t_{RGVextend} \quad (11)$$

$$T_{serve} = 3t_{RGVstart} + t_{liftstart} + (|x_{initial} - x_{L/O}| + |x_{lift} - x_{L/O}| + |x_{lift} - x_{re}|) \times t_{RGVi} + |z_{initial} - z_{re}| \times t_{liftk} + 2t_{RGVextend} \quad (12)$$

$$T_{serve} = 3t_{RGVstart} + t_{liftstart} + (|x_{initial} - x_{lift}| + |x_{lift} - x_{re}| + |x_{L/O} - x_{re}|) \times t_{RGVi} + |z_{initial} - z_{re}| \times t_{liftk} + 2t_{RGVextend} \quad (13)$$

$$T_{\text{serve}} = 4t_{\text{RGVstart}} + 2t_{\text{liftstart}} + (|x_{\text{initial}} - x_{\text{lift}}| + |x_{\text{lift}} - x_{\text{re}}| + |x_{\text{lift}} - x_{\text{L/O}}|) \times t_{\text{RGVi}} + (|z_{\text{initial}} - z_{\text{re}}| + |z_{\text{L/O}} - z_{\text{re}}|) \times t_{\text{liftk}} + 2t_{\text{RGVextend}} \quad (14)$$

定义 6 种立体车库客流状态, 各状态下的顾客存取车到达率特征和排队情况如下.

1) 自由存取状态: 存取车到达率均较低, 基本不发生排队现象.

2) 同步存车状态: 存车到达率高于取车到达率, 可能发生排队现象, 不发生顾客长时间等待不耐烦离去现象.

3) 同步取车状态: 取车到达率高于存车到达率, 可能发生排队现象, 不发生顾客长时间等待不耐烦离去现象.

4) 存车高峰状态: 存车到达率远高于取车到达率, 易发生排队现象, 可能发生顾客长时间等待不耐烦离去现象.

5) 取车高峰状态: 取车到达率远高于存车顾客到达率, 易发生排队现象, 可能发生顾客长时间等待不耐烦离去现象.

6) 繁忙堵塞状态: 存取车到达率均较高, 发生长时间排队的现象, 易发生顾客等待不耐烦离去的现象.

根据车库参数和存取车服务时间模型建立立体车库仿真程序, 计算立体车库长时间固定到达率下的运行评价指标, 并通过不同中间到达率区间区分存车和取车顾客, 得到不同客流状态的初始聚类中心作为客流状态聚类时的输入参数.

2 FCM 聚类方法

2.1 FCM 算法简介

确定客流模式划分类别后, 对客流模式进行聚类分析研究. 交通状态聚类中常用算法有 k -means、层次聚类及 FCM^[10-11]等, 相对于 k -means 和层次聚类等硬聚类算法, FCM 由硬性隶属关系提升为软性隶属关系, 使每个值对各类中心点都有贡献, 中心点的迭代更易达到全局最优. 已有研究应用 FCM 聚类实现了城市道路^[12]、高速公路^[13]及航空空域^[14]等交通运营场景的交通状态聚类, 均获得可靠的聚类结果. 本研究选用 FCM 对立体车库客流进行聚类研究.

FCM 算法的原理是通过目标函数得到每个样本

点对所有类中心的隶属度, 最终决定样本点的类属. FCM 算法的目标函数为

$$J_m(U, X, C) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^k m_{ij}^m \|x_i - c_j\|^2 \quad (15)$$

其中, n 为样本数量; X 为立体车库存取车到达率样本集, $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$, x 为样本点; k 为聚类中心数量; $C = \{c_1, c_2, \dots, c_k\}$ 为聚类中心集, c 为聚类中心点; $U = [\mu_{ij}]$ 为隶属度矩阵, 其限定条件为

$$\begin{cases} \sum_{j=1}^k \mu_{ij} = 1 \\ 0 \leq \mu_{ij} \leq 1, & i = 1, 2, \dots, n \\ & j = 1, 2, \dots, k \\ 0 < \sum_{i=1}^n \mu_{ij} < 1 \end{cases} \quad (16)$$

输入初始聚类中心或初始隶属度矩阵, 不断迭代计算更新聚类中心和隶属度矩阵, 根据最终得到的隶属度矩阵和聚类中心将不同样本归入不同簇中, 将样本集划分为 k 个模糊簇, 完成聚类.

FCM 算法的步骤如下:

步骤 1 确定聚类个数 k 、模糊系数 m 、最大迭代次数 $b_{\max}$ 及迭代终止阈值 ε .

步骤 2 初始化聚类中心 c_i ($i = 1, 2, \dots, k$) 或初始隶属度矩阵 U .

步骤 3 分别通过式 (17) 和 (18) 更新计算聚类中心和隶属度矩阵.

$$c = \sum_{i=1}^n (\mu_{ij})^m x_i / \sum_{i=1}^n (\mu_{ij})^m, j = 1, 2, \dots, k \quad (17)$$

$$\mu_{ij} = 1 / \sum_{t=1}^k \left(\frac{d_{ij}}{d_{it}} \right)^{2/(m-1)} \quad (18)$$

步骤 4 比较原隶属度矩阵与更新后的隶属度矩阵, 若满足 $\|U^{b+1} - U^b\| \leq \varepsilon$ 或 $b \geq b_{\max}$, 则停止更新迭代, 转到步骤 5; 否则返回步骤 3.

步骤 5 依据式 (19) 对最终得到的聚类中心和隶属度矩阵将样本进行归类, 完成客流状态的聚类.

$$x_i \in C_p, \mu_{ip} = \max \mu_{ij}, j = 1, 2, \dots, k \quad (19)$$

2.2 聚类评价指标

聚类结果的评价准则包括内部准则、外部准则

和相对准则^[15]. 由于对立体车库聚类分析时,无法得知样本的实际类别,因此,不宜使用外部准则. 本研究综合考虑内部准则和相对准则对聚类进行评价.

内部准则即用与聚类样本数据集相关的指标对聚类结果进行评估. 本研究使用聚类中心偏移距离 $D(i)$ 衡量客流状态聚类结果的内部特征,计算不同聚类方法下终止聚类中心相对于初始聚类中心的欧式距离,距离越小,说明其更接近初始聚类中心,更能反映立体车库运行特征.

$$D(i) = \|c'_i - c_i\|^2, i = 1, 2, \dots, k \quad (20)$$

其中, c_i 为第 i 个类别的终止聚类中心; c'_i 为第 i 个类别的初始聚类中心.

相对准则即根据已定义的评价指标对聚类结果进行评价,定义评价指标时遵循类内间距最小,类间间距最大的原则. 本研究使用轮廓系数 (silhouette coefficient) 和分类适确性指标 (Davies-Bouldin index) 作为聚类评价指标. 其中,轮廓系数范围为 $[-1, 1]$,值越大说明聚类效果越好;分类适确性指标的取值范围为 $(0, 1)$,值越小说明聚类效果越好. 轮廓系数 SC 和分类适确性指标 DB 为

$$SC = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \frac{b_i - a_i}{\max(b_i, a_i)} \quad (21)$$

$$DB = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \max_{i \neq j} \frac{S_i + S_j}{\|c_i - c_j\|^2} \quad (22)$$

其中, a_i 为第 i 个类别中每个样本到其同类所有样本的平均距离; b_i 为第 i 个类别中每个样本到其他类别中最近一个类别所有样本的平均距离; S_i 为 i 类别的类内平均距离; c_i 为 i 类别的聚类中心; S_j 为 j 类别的类内平均距离; c_j 为 j 类别的聚类中心.

2.3 聚类算法参数选择

2.3.1 初始聚类中心 c_i

FCM 算法需要确定初始聚类中心或初始隶属度矩阵,通过不断迭代更新聚类中心和隶属度矩阵,最终完成聚类,FCM 对初始值较敏感,不同初始条件会对算法速度和算法精度产生影响. 确定初始聚类中心一般有随机法、重心法、密度法及经验法,初始隶属度矩阵通过生成随机矩阵法选取.

经验法即根据样本特征和划分需求,用经验办法找出直观上比较合适的点作为初始聚类中心,相对于其他方法能更好反映样本的先验特征. 本研究根据 1.2 节仿真模拟得到的不同到达率下立体车库

运行指标,作为经验选取初始聚类中心.

2.3.2 模糊系数 m

如式(17)和(18)所示,模糊系数 m 包含于聚类中心和隶属度矩阵的迭代表达式中,通过直接作用于聚类中心和隶属度矩阵对最终聚类结果产生影响, m 的取值范围为 $(1, \infty)$,若取值过小,会使聚类结果受噪声点影响较大;若取值过大,会使得聚类对偏离主流的样本控制力不足. 由于样本自身特征不同,不同样本具有不同的最优模糊系数,因此,需要找出最优模糊系数. 本研究设定步长为 0.2,选取模糊系数范围为 1.2 ~ 4.0 对样本进行聚类,计算其在不同取值下的聚类评价指标,得出最优模糊系数值.

3 客流聚类实例

以中国西安市小寨军人服务社区商场附属立体车库作为研究对象,其车库结构为 2 层 31 列 2 排,可用车位数量为 94 个,所有车位均位于地下,2 个 I/O 均位于地面(第 3 层). 统计其 2017 年 7 月份上位机数据库中的顾客到达数据,计算得到 961 个存车到达率数据,961 个取车到达率数据.

经过现场调研得到研究对象的结构和设备特征参数值,给定以下条件,完成立体车库运行仿真程序的编写.

1) 2 个 I/O 口坐标分别为 (28, 1, 3) 和 (31, 1, 3).

2) 2 个升降机横坐标分别为 1 和 31,其启动时间为 5 s,竖直运动 1 层的时间为 6 s,每次寻找当前距离最近且空闲的升降机作为目标升降机.

3) 车库中有 3 台 RGV,其启动时间为 5 s,水平运动 1 个车位的时间为 6 s,进入车位进行存车的时间为 15 s,车库中调度方式为存车优先.

4) 车位分配方式为就近分配.

5) 顾客服务方式依据先到先服务原则.

6) 依据文献[16],库内停留时间服从正态分布,统计历史车辆停留时间数据,进行数据拟合得到本车库车辆停留时间(单位: min)的正态分布均值 $\mu = 159$ min,方差 $\sigma = 240$.

7) 由于车库库位初始情况对长时间车库运行的影响很小,因此,设定车库的初始状态均为空库状态.

改变顾客到达率 λ 的值,根据上述给定条件和式(2)至(15)仿真不同顾客到达率下,立体车库一

天 (07:00—22:30) 中的运行情况, 并计算车库参数指标. 不同到达率下的参数结果如图 3.

(a) 平均排队队长模拟结果

(b) 平均存取车服务时间模拟结果

(c) 平均总等待时间模拟结果

图 3 不同到达率下立体车库运行参数模拟结果

Fig. 3 Simulation results of automated garage operating parameters under different arrival rates

由图 3 可见, 各指标总体趋势均随顾客到达率的升高而升高. 选取平均等待队长为 0.5、1.0 和 1.5 veh 作为客流模式的分界点, 对应的顾客到达率分别为 20、30 和 35 veh/h, 4 种客模式划分结果如表 4.

在表 4 基础上区分顾客存车到达和顾客取车到达, 划分得到 6 个立体车库顾客客流状态, 即自由存取状态、同步存车状态、同步取车状态、存车高

峰状态、取车高峰状态及繁忙阻塞状态, 选定 6 种客流状态的初始聚类中心分别为 (5,5)、(8,17)、(17,8)、(10,22)、(22,10) 及 (20,20).

表 4 立体车库客流状态划分

Table 4 Automated garage passenger flow state division

客模式	存取车 到达率/ (veh·h ⁻¹)	平均排 队队 长/veh	平均存取 车服务 时间/min	平均总 等待时 间/min
自由模式	[0,20)	[0,0.5)	[0,1.5)	[0,2.0)
同步模式	[20,30)	[0.5,1.0)	[1.5,1.8)	[2.0,3.5)
高峰模式	[30,35)	[1.0,1.5)	[1.8,2.0)	[3.5,5.0)
繁忙堵塞模式	[35,∞)	[1.5,∞)	[2.0,∞)	[5.0,∞)

输入立体车库顾客存取车到达率数据, 分别使用 k -means、层次聚类及 FCM 算法对顾客存取车的数据样本进行聚类. 设定聚类个数均为 6 个, 选择距离度量方式均为欧氏距离, 对于 k -means 和 FCM 算法, 设定最大迭代次数为 400、终止阈值为 1×10^{-3} , FCM 算法模糊系数 m 设置为 2.0, 对于层次聚类, 采用凝聚层次聚类法, 类间相似度度量方式为 ward 方式. 完成聚类后使用不同实心符号区分不同聚类类别, 使用不同空心符号标出各类别的终止聚类中心, 聚类结果如图 4.

由图 4 可见, k -means、层次聚类和 FCM 聚类算法均可完成对立体车库顾客存取车到达数据的聚类, 其中, FCM 算法不同类别边界线更接近于直线, 且各类别数量更平均. 计算各聚类算法的评价指标如表 5.

表 5 聚类结果评价指标

Table 5 Clustering results criteria evaluation indicators

聚类方法	轮廓系数	分类适确 性指标	平均聚类中心偏移 距离/(veh·h ⁻¹)
k -means	0.383 634	0.863 253	3.071 96
层次聚类	0.328 661	0.956 452	2.302 99
FCM	0.384 729	0.831 076	1.632 82

由表 5 可见, FCM 聚类在轮廓系数和分类适确性指标上优于 k -means 和层次聚类算法, 表明其聚类结果类内数据相似度较高, 类间数据相似度较低, 且 FCM 算法的聚类中心偏移距离均值更优, 表明其更能体现车库本身特征. 因此, 使用 FCM 对立体车库存取车顾客到达进行聚类时, 不仅获得

图4 立体车库客流状态聚类结果

Fig. 4 (Color online) Automated garage passenger flow state clustering results

较优的相对准则评价指标, 同时更能反映立体车库自身运行特征, 有助于从聚类结果中更好地获取聚类标签, 以指导立体车库管理调度和管理。

由于立体车库周边环境及驾驶人的出行行为特

征不断变化, 为了能反映当前时期的客流状态信息, 对立体车库客流数据聚类做实际分析时, 应选取近期数据。

结 语

研究了平面移动式立体车库客流状态聚类, 提出基于FCM算法的立体车库客流模式聚类划分方法。建立立体车库的运行模型, 模拟得到不同顾客到达率下立体车库的运行特征, 以模拟运行结果和实际客流数据作为车库客流聚类的输入条件, 使用FCM算法完成车库客流状态的聚类。以西安市小寨军人服务社区商场附属立体车库实际数据进行验证, 聚类结果表明, FCM算法可获得更优的评价指标, 较为可靠、准确地反映车库客流特征, 为立体车库存取设备调度优化和管理提供指导。今后研究将考虑巷道堆垛式立体车库, 分析其运行特征和客流到达之间的关系, 得到适用性更好的立体车库客流模式聚类方法。

基金项目: 甘肃省建设厅资助项目 (JK2016-10)

作者简介: 贺云鹏 (1994—), 兰州交通大学硕士研究生。研究方向: 交通信息工程及控制。E-mail: interhyp@126.com

引 文: 贺云鹏, 李建国. 平面移动式立体车库客流状态聚类研究[J]. 深圳大学学报理工版, 2020, 37(3): 314-322.

参考文献 / References:

- [1] 付翠玉, 关景泰. 立体车库发展的现状与挑战[J]. 机械设计与制造, 2005(9): 156-157.
FU Cuiyu, GUAN Jingtai. Status and challenge of the development of solid garage [J]. Machinery Design & Manufacture, 2005(9): 156-157. (in Chinese)
- [2] 冉江宇, 过秀成, 陈永茂, 等. 基于聚类非参数检验的动态停车需求分布特征[J]. 东南大学学报自然科学版, 2011, 41(4): 871-876.
RAN Jiangyu, GUO Xiucheng, CHEN Yongmao, et al. Dynamic parking demand distribution character based on clustering non-parameter tests [J]. Journal of Southeast University Natural Science Edition, 2011, 41(4): 871-876. (in Chinese)
- [3] 华文瀚, 田怀文. 堆垛式立体车库存取车策略及路径优化问题的分析研究[J]. 机械设计与制造, 2011(3): 260-262.
HUA Wenhan, TIAN Huaiwen. Research on storage-retrieval operation strategy and optimization of automatic stereoscopic garage [J]. Machinery Design & Manufacture

- ture, 2011(3): 260-262. (in Chinese)
- [4] 刘美菊, 彭堰艳, 龚志恒, 等. 基于随机森林的群控立体车库运行模式识别研究[J]. 电子器件, 2014, 37(3): 514-518.
- LIU Meiju, PENG Yanyan, GONG Zhiheng, et al. Stereoscopic garage group control traffic pattern recognition based on random forests [J]. Chinese Journal of Electron Devices, 2014, 37(3): 514-518. (in Chinese)
- [5] CHERIAN J, LUO Jun, GUO Hongliang, et al. Park gauge: gauging the congestion level of parking garages with crowd sensed parking characteristics [C]// Proceedings of the 13th ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems. Seoul, South Korea: ACM, 2015: 395-396.
- [6] 陆化普, 李瑞敏. 城市智能交通系统的发展现状与趋势[J]. 工程研究——跨学科视野中的工程, 2014, 6(1): 6-19.
- LU Huapu, LI Ruimin. Developing trend of ITS and strategy suggestions [J]. Journal of Engineering Studies, 2014, 6(1): 6-19. (in Chinese)
- [7] 范鲁明, 贺国光. 改进非参数回归在交通流量预测中的应用[J]. 重庆交通大学学报自然科学版, 2008, 27(1): 96-99.
- FAN Luming, HE Guoguang. Application improvement of nonparametric regression to traffic flow forecast [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University Natural Science, 2008, 27(1): 96-99. (in Chinese)
- [8] ELENI V, KONSTANTINOS K, VASSILEIOS T, et al. A real-time parking prediction system for smart cities [J]. Journal of Intelligent Transportation Systems: Technology, Planning, and Operations, 2016, 20(2): 192-204.
- [9] JB/T 8713-1998. 机械式停车设备类别, 型式与基本参数[S].
- JB/T 8713-1998. Mechanical parking systems-classification, models and basic parameters [S]. (in Chinese)
- [10] 张琳琳, 李雪玮, 李振龙, 等. 基于两阶段 K-means 聚类的道路运行状况评价方法 [J]. 交通信息与安全, 2017, 35(5): 99-105.
- ZHANG Linlin, LI Xuewei, LI Zhenlong, et al. An evaluation method of road operation condition based on two-stage K-means clustering [J]. Journal of Transport Information and Safety, 2017, 35(5): 99-105. (in Chinese)
- [11] 张亮亮, 贾元华, 牛忠海, 等. 交通状态划分的参数权重聚类方法研究 [J]. 交通运输系统工程与信息, 2014, 14(6): 147-151.
- ZHANG Liangliang, JIA Yuanhua, NIU Zhonghai, et al. Traffic state classification based on parameter weighting and clustering method [J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2014, 14(6): 147-151. (in Chinese)
- [12] 陈忠辉, 凌献尧, 冯心欣, 等. 基于模糊 C 均值聚类和随机森林的短时交通状态预测方法 [J]. 电子与信息学报, 2018, 40(8): 1879-1886.
- CHEN Zhonghui, LING Xian Yao, FENG Xinxin, et al. Short-term traffic state prediction approach based on FCM and random forest [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2018, 40(8): 1879-1886. (in Chinese)
- [13] 陈钊正, 吴 聪. 多变量聚类分析的高速公路交通流状态实时评估 [J]. 交通运输系统工程与信息, 2018, 18(3): 225-233.
- CHEN Zhaozheng, WU Cong. A method of traffic state estimation for expressway based on multivariate clustering analysis [J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2018, 18(3): 225-233. (in Chinese)
- [14] 李晓璐, 于昕明, 杜 崇, 等. 基于权值优化的 FCM-MSVM 算法及其在高速公路状态判别中的应用 [J]. 北京交通大学学报, 2018, 42(4): 72-78, 84.
- LI Xiaolu, YU Xinming, DU Chong, et al. FCM-MSVM algorithm based on weight optimization and its application in state identification of freeway [J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2018, 42(4): 72-78, 84. (in Chinese)
- [15] JULIA H, KNOWLES J, KELL D B. Computational cluster validation in post-genomic data analysis [J]. Bioinformatics, 2005, 21(15): 3201-3212.
- [16] PORTILLA A I, OREÑA B A, BERODIA J L M, et al. Using M/M/ ∞ queueing model in on-street parking maneuvers [J]. Journal of Transportation Engineering, 2009, 135(8): 527-535.

【中文责编: 方 圆; 英文责编: 淡 紫】