arXiv:2601.05429v1 [cs.MA] 8 Jan 2026

向基于拍卖的智能停车分配系统转型

Levente Alekszejenk´o[a] 和 Tadeusz Dobrowiecki[a]

[a]布达佩斯科技经济大学人工智能与系统工程系，M″
uegyetem rkp. 3., H-1111 匈牙利布达佩斯

文章历史
编于2026年1月12日

摘要

过去几十年来，在城市中找到空闲停车位已成为一项颇具挑战的任务。近期提出的基于拍卖的停车分配能够缓解巡游寻找停车位的问题，并设定由市场驱动、响应需求的停车价格。然而，这类系统能否得到广泛认可，仍远未确定。

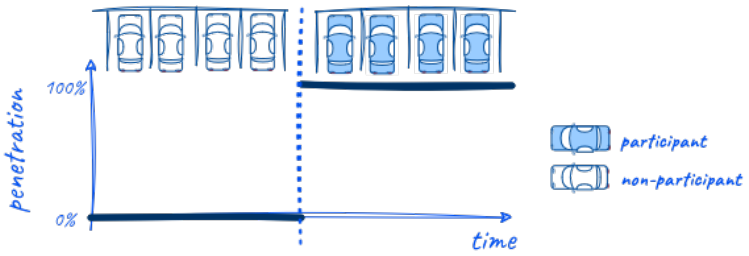
为了评估基于拍卖的停车分配的优点，我们假设在强制推行该系统之前，驾驶员可以使用基于智能手机的预约系统，因此有机会自愿试用并体验其优点。我们使用 Eclipse SUMO 进行仿真实验，设置不同的参与者与非参与者比例，以考察不同市场渗透率如何影响交通流、基于拍卖的分配系统的表现以及财务结果。结果显示，随着渗透率提高，基于拍卖的系统能够改善交通流，使参与者逐渐能够在更靠近其首选停车场的位置停车。不过，这也有代价：该系统还会增加参与者的停车支出。有趣的是，非参与驾驶员将面临更高的停车价格。因此，他们会受到激励，转而使用这一新系统。

关键词
智能停车分配；过渡；拍卖；市场渗透率

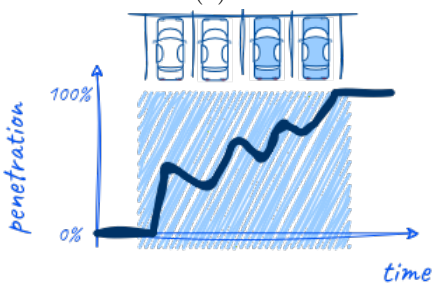
1. 引言

近几十年来，在城市中央商务区（CBD）寻找空闲路边停车位已成为一个棘手的问题。根据 Shoup（2021）的说法，15-68% 的车辆可能会在路上巡游寻找免费停车位，这会大幅增加交通运输造成的有害排放，并使行程时间额外增加 3.3-15.4 分钟。因此，为解决这一问题，正如 Lin、Rivano 和 Le Mou¨el（2017）所总结的，许多城市投入了数百万美元建设智能停车系统。考虑到大多数城市无力实施此类复杂的解决方案，采用多智能体人工智能方法可能是一种负担得起的替代方案。例如，Z. Chen、Yin、He 和 Lin（2015）提出了一种基于维克里-克拉克-格罗夫斯（VCG）拍卖的智能停车分配方案，该方案除了分配停车位外，还能

联系人：Levente Alekszejenk´o。电子邮箱：alekszejenko.levente@vik.bme.hu



(a)



(b)

图1：（a）停车场运营商可能会要求驾驶员必须使用智能停车场分配系统。在这种情况下，渗透率会立即从0%升至100%。（b）如果驾驶员可以自愿参与一项新系统，则会形成一个渗透率不断变化的过渡过程。

优化停车价格，以响应当前需求。Shoup（2021）指出，这种由市场驱动的价格对于路边停车而言是最优的。

遗憾的是，驾驶员未必愿意接受更高的停车价格，Hashimoto、Kanamori 和 Ito（2013）；Simi´cevi´c、Milosavl- jevi´c、Maleti´c 和 Kaplanovi´c（2012）；以及 Vidovic 和 Simicevic（2023）的问卷调查均指出了这一点。因此，市政府不太可能像图1a所示那样，要求企业采用基于拍卖的停车分配系统。然而，根据 Maranguni´c 和 Grani´c（2015）的技术接受度调查，如果用户自愿认识到基于拍卖的停车分配的实用性，他们很可能会接受并使用该系统。如果系统能够节省时间、防止巡游，或许还能省下一些钱，驾驶员就会认为它有益。若系统能够证明其优势，就会吸引越来越多的用户。与强制使用的系统不同，这一过程将推动传统停车分配系统向全自动停车位分配系统过渡，见图1b。然而，许多研究，例如 Ozioko、Kunkel 和 Stahl（2022）；Yu 等人（2021），探讨了人类驾驶员与自动驾驶车辆混合交通的影响，但只有少数文章关注有参与和未参与驾驶员并存的智能停车解决方案。

我们旨在通过研究从传统停车系统向基于拍卖的停车分配方案的转型，填补这一研究空白。我们设置不同的参与驾驶员与非参与驾驶员比例（渗透率），开展微观交通仿真，以回答以下问题：

- 基于拍卖的停车分配的市场渗透率会如何影响中央商务区的交通?
- 基于拍卖的停车分配是否足够有利，能够吸引更多

用户在其进入市场后立即使用?

- 基于拍卖的停车分配的市场渗透率如何影响停车成本?

本文其余部分安排如下：第2节介绍相关研究。第3节提出采用升价拍卖进行停车场分配。第4节介绍评估所用的仿真场景。第5节根据仿真结果回答上述研究问题。最后，第6节总结全文。

2. 相关研究

自1935年安装首台停车计时器以来，路边停车定价一直需要经济学家、工程师和政治家的精心规划。根据 Inci（2015）的研究，如果路边停车定价过低，就会导致超额需求，迫使驾驶员寻找空闲停车位。另一方面，采用由市场驱动的时空停车费，市政当局便能消除巡游寻找停车位的现象。

Waraich、Dobler、Weis 和 Axhausen（2012）提出了一种用于停车价格时空优化的遗传算法，而 Anderson 和 de Palma（2004）则提出了一种数值解。针对在线优化，Z. Chen 等人（2015）提出了一种以智能手机应用程序部署的维克里-克拉克-格罗夫斯（VCG）拍卖机制。除了智能手机应用程序，基于拍卖的停车分配系统还可以利用车载雾计算的能力，例如 Zhang、Wang 和 Wei（2018、2019）的研究。由于 VCG 无法实现预算平衡，Cheng、Inci、Xu 和 Zhai（2023）通过限制可被分配到停车位的代理人数，引入了尺度控制来满足这一性质。出于同样的原因，Xiao、Xu 和 Gao（2018）在其双重拍卖机制中提出了需求方竞争填充法。与驾驶员竞逐停车场这一常见做法不同，Tan、Xu、Kang、Xu 和 Qin（2021）描述了一种反向维克里拍卖，在这种拍卖中，停车位竞逐车辆。

尽管智能停车解决方案能够消除巡游寻找停车位的现象并改善交通流，但正如 Khalid 等人（2021）的综述所指出的，数据隐私仍是一个尚未解决的问题。S houp（2021）总结道，最优停车位能够使停车和步行的总时间成本与金钱成本最低。因此，在 VCG 拍卖中报告停车位竞价，可能会泄露驾驶员有关其财务和健康状况的私人信息，例如他们步行的意愿或能力。基于 Demange、Gale 和 Sotomayor（1986）的研究，Bansal 和 Garg（2005）指出，采用本地贪心竞价（LGB）的去中心化同时独立升价拍卖（SIA），能够整合同时运行的独立在线拍卖。在这种方法中，去中心化的停车场拍卖代理只会获得少量信息位，用以判断驾驶员在给定时间、针对给定竞价是否认为该停车位最优。Rizvi、Zehra 和 Olariu（2021）将 SIA 应用于智能停车分配，并通过仿真框架对其进行测试。本文采用了类似的方法。我们实现了一种采用 LGB 的货币型英式同时独立升价拍卖的变体（见第 3 节），并在 Eclipse SUMO 中通过仿真评估其在不同渗透率下的性能；该仿真工具由 Alvarez Lopez 等人（2018）开发。

然而，正如 Khalid 等人（2021年）的研究所反映的那样，许多论文聚焦于智能停车解决方案；只有少数文章分析了它们对社会的影响。R. Chen,

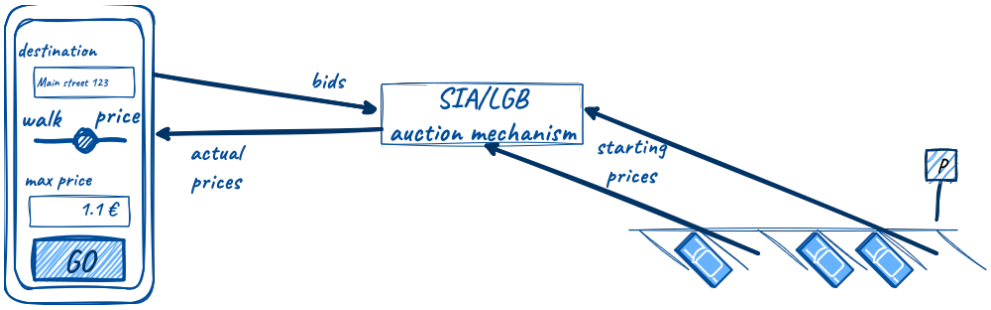


图 2：假定的基于拍卖的停车分配系统概览。驾驶员可以在智能手机应用中设置目的地、对步行距离和停车价格的偏好，以及其愿意支付的最高停车价格。该应用连接至同时独立升价拍卖服务，以报告其局部贪心出价（SIA/LGB）。区域内的每个空闲停车位都对应一场拍卖，并设有预先确定的起始价格。

Gao、Pan、Liu 和 Mao（2024年）担心，基于拍卖的停车分配可能导致市场不公平。能够且愿意支付更高停车费用的高收入驾驶员，可能会使低收入驾驶员无法找到合适的停车位。与任何新颖的解决方案一样，自愿参与的基于拍卖的停车场分配系统需要一定时间才能获得技术接受度。在本研究中，我们将参与驾驶员人数与驾驶员总人数之比称为渗透率。由于智能停车解决方案在市场早期阶段、渗透率较低时可能产生不同的结果，研究人员还应评估创新者和早期采用者是否能从所提出的系统中获益。此外，根据 Meade 和 Rabelo（2004年）的观点，系统运营者还应规划产品与营销策略，以反映产品生命周期各阶段利益相关者的需求。Huajun Chai 和 Zhang（2019年）评估了动态重新规划路线系统的渗透率，该系统旨在降低停车库中的行程时间和停车成本。他们发现，渗透率越高，与停车相关的成本就越低，出行时间也越短。Ni 和 Sun（2017年）提出了一种停车预约系统，并考察了其在不同渗透率下的表现。根据他们的研究结果，随着所提出系统的渗透水平提高，普通车辆需要行驶更远的距离，其驾驶员也需要步行更远。Leclercq、S´en´ecat 和 Mariotte（2017年）的研究表明，即使是较简单的引导系统——它只在交叉口告知驾驶员能否在下游路段找到空闲车位——也能显著缩短市场早期阶段的平均搜索距离；而在渗透率较高时，落后采用者的搜索距离则会大幅增加。

3. 拍卖机制

与 Z. Chen 等人（2015年）的研究类似，我们假设基于拍卖的停车系统可以作为智能手机应用程序部署，因为绝大多数人都能使用智能手机；参见 Sidoti 等人（2024年）的统计数据。驾驶员可以选择使用这一移动应用，引导自己前往为其分配了空闲停车位的停车设施，见图 2。驾驶员可以输入目的地、对较长步行距离与较高停车费的偏好，以及他们愿意支付的最高停车金额。该应用程序结合了

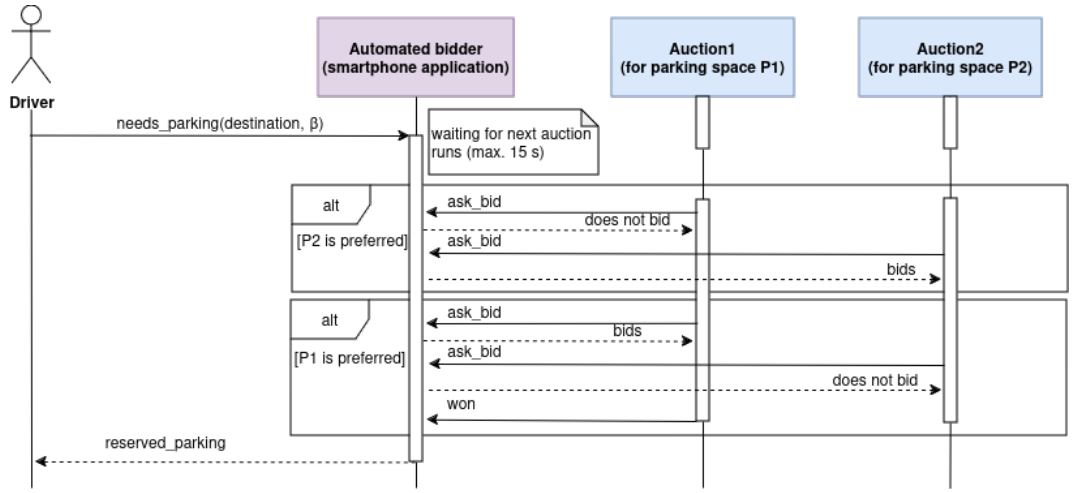


图 3：SIA 拍卖运行示例。驾驶员通过智能手机应用程序请求停车位。该应用程序根据驾驶员的偏好（β）和目的地参与同时拍卖，以预订停车场。拍卖结束后，驾驶员将获知可以在哪里找到其预留的停车位。

导航和停车预订服务的功能，并引导人类驾驶员前往空闲停车位。应用程序会在后台根据驾驶员给出的偏好自动参与 SIA 拍卖。

SIA 拍卖彼此独立地运行，与 Bansal 和 Garg（2005年）中的方式相同；因此，目前有空余停车位的每个停车运营商都可以组织自己的拍卖 A_i ，并设定预先确定的最低起拍价 $p_i^{(0)}$ 。拍卖服务负责安排拍卖，即在所采用的实现中，[1], 拍卖每隔 15 秒启动一次。由于拍卖的执行时长受空余停车场数量与驾驶员愿意支付的最高停车价格和起拍价之间最大差额的乘积限制，我们假设拍卖可以在这 15 秒的周期内完成计算。

参与者的智能手机会在这些拍卖中注册，以竞拍停车场。之后，每轮中，每场拍卖 A_i 都会询问每个已注册的智能手机代理 j 是否愿意按当前 p_i 价格竞拍停车位，见图 3。如果参与者出价，拍卖 A_i就会将当前价格小幅提高 ϵ， $p_i' \leftarrow p_i + \epsilon$。如果一段时间内无人出价，拍卖便会结束。获胜者将能够使用 A_i停车位。这种方式对应于互联网上的在线拍卖。为简单起见，本文将中标价视为实际停车价格，不考虑停车时长。

智能手机代理采用 Bansal 和 Garg（2005）的本地贪心竞价（LGB）策略，以获得至多一个空闲停车位。因此，代理最多只能在同时进行的拍卖中选择一场提交当前竞价。根据 Shoup（2021），我们考虑两个因素，以确定代理 j是否会出价。$d_{i,j}$ 衡量拍卖中提供的停车场 A_i 与参与者 j目的地之间的行驶距离。由于人们可以走捷径并步行穿过通道，行驶距离总是高估了

[1]有关实现的详细信息，请访问我们的 GitHub 代码库：
https://github.com/alelevente/penparking

城市中两点之间的步行距离。停车场选择的另一个重要因素是 p_i 停车价格。对于某些活动（例如购物或送货员给我们送包裹时），驾驶员更倾向于选择尽可能近的停车选项；而对于其他活动（例如参与某些休闲活动时），我们可能更倾向于选择价格较低（但可能距离较远）的停车场。为表达这种对停车场的态度，我们引入一个 $\beta \in (0, 1]$ 态度因子，用于权衡停车价格和步行距离。

出于技术原因，令 p_{max} 表示拍卖中的当前最高价格，令 $d_{j,\ max}$ 表示距离 j目的地最远的停车场到该目的地的行驶距离。然后，考虑态度因子 β，我们计算参与者 j 在拍卖 A_i所出售停车位上的总$c_{i,\ j}$ 停车成本如下：

$$c_{i,j} = \beta \frac{p_i}{p_{max}} + (1 - \beta) \frac{d_{i,j}}{d_{j,max}}. \tag{1}$$

通过设置更高的 β，驾驶员可以表达其对价格更低但可能距离更远的停车位的偏好；反之，设置较低的 β时，驾驶员可以偏好距离更近的停车场。

每个代理 j 都试图最小化$c_{i,\ j}$ 总停车成本（由货币形式的停车支出和步行距离构成）；因此，在拍卖 i 中竞价的代理 j的效用函数可以表示为$U_{i,\ j} = 1 - c_{i,\ j}$。由此可得代理 j 偏好的拍卖为 Π_j：

$$\Pi_j = \arg\min_i c_{i,j}. \tag{2}$$

因此，如果代理 j 的出价被超过，则其应在拍卖 Π_j中进行下一次竞价。每个人必然都有一个可用于停车的 p_{max} 限额（个人估值），否则拍卖将无法终止。在我们的研究中，我们采用了 $p_{max} = 5.0$ € 停车估值和 $\epsilon = 0.05$ € 竞价步长。拍卖结果为参与车辆与停车场之间建立了分配关系，同时也确定了市场驱动定价。

如果参与拍卖的驾驶员 j（由智能手机代理表示）赢得拍卖，智能手机代理便可规划前往其赢得并已虚拟预留的停车位的路线[2]。

另一方面，非参与者驾驶员通过传统方法寻找空闲停车位：他们巡游寻找停车位，并支付预先设定的停车价格。此外，由于他们不使用分配系统，因此无法得知自己可能会占用为参与者车辆预留的停车位。在这种情况下，我们假设参与者驾驶员会改用传统的寻找停车位的方法，继续巡游直到找到空闲车位，并支付原有费用。

4. 仿真

为了分析不同渗透率如何影响基于 SIA 拍卖的停车分配系统，我们进行了多次仿真。为了将模拟车辆建模并控制为独立的智能代理，我们使用了由 Alvarez Lopez 等人（2018）开发的微观交通仿真工具 Eclipse SUMO。Eclipse SUMO

[2]具体而言，在仿真过程中，如果参与者车辆驶离分配给它的停车位，或者预留在实际中未能成功，我们就会取消预留。后一种情况发生于非参与者在参与者驾驶员抵达之前占用了预留停车位。

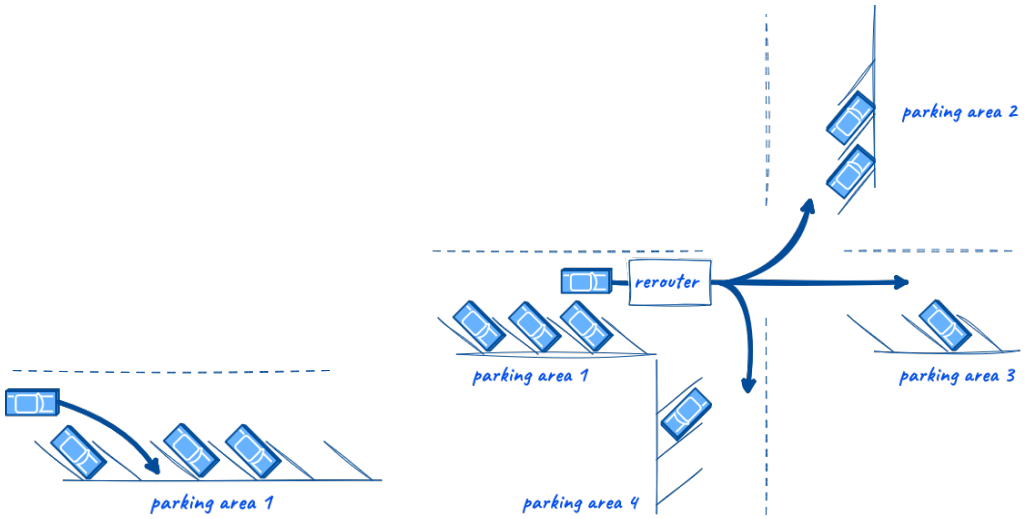


图 4.：Eclipse SUMO 中的停车仿真。(a) 如果车辆指定的停车区域内有空位，车辆就会占用第一个空位。(b) 当指定的停车区域已满时，车辆可以通过停车区域改道器改道至邻近停车区域。

在代理层面模拟车辆，计算车辆的纵向和横向运动，并考虑车辆之间以及车辆与基础设施（如交通信号灯或停车场）之间的交互。

4.1. Eclipse SUMO 中的停车仿真

Eclipse SUMO 提供停车仿真功能，参见 Codec´a、Erdmann 和 H¨arri（2018年）。首先，需要在模拟道路网络中定义停车区域[3] 。然后，通过为模拟车辆分配停车区域内的停车站点[4]，即可指示它们占用一个空闲停车位，并在此停留预先设定的时间。

在仿真过程中，如图 4 所示，车辆会尝试占用停车站点事件所指定停车区域内的第一个空闲停车位。然而，指定的停车场可能已满。在这种情况下，通过放置停车区域改道器[5]，，Eclipse SUMO 可以将车辆调度至（默认情况下以相同概率）当前至少有一个空闲停车位的最近停车区域（位于两条街区的距离范围内）。因此，Eclipse SUMO 仿真了 Dowling、Ratliff 和 Zhang（2020年）提出的基于队列和街区路段的模型，用于模拟巡游寻找停车位。

4.2. 停车场景

为了得出普遍性的结论，我们创建了一个抽象的仿真场景，而不是从少数几个现实场景中挑选一个。这样可以避免特定网络带来的

[3]参见 Eclipse SUMO 的停车区域文档，访问日期：2025年6月11日。[4]参见 Eclipse SUMO 的车辆定义文档，访问日期：2025年6月11日。[5]参见停车区域改道器文档，访问日期：2025年6月11日。

偏差。通过优化，我们建立了一个可用停车场数量与停车需求大致平衡的场景。因此，在仿真运行过程中，停车占用率（即已占用停车场数量与停车场总数之比）会保持稳定。如果增加交通流量，由于车辆找不到空闲停车位，整个仿真就会陷入死锁。另一方面，如果增加停车场，车辆就不会再绕行寻找停车位。

具体而言，我们仿真场景中的道路网络是一个 6×6 网格网络，交叉口间距为 100 米，对应于典型街区的大小。我们使用该模型来仿真中央商务区（CBD）约 4 小时的交通情况。该区域提供路边停车位，供短时停留的车辆使用（停留时间在 15 至 45 分钟之间均匀随机分布），例如去商店、在餐厅用餐或到办公室会面。中央商务区最内侧区域吸引的仿真访客数量多于仿真网络外围，共有 11520 名访客。

在仿真中，我们将道路网络建模为有向图，以图节点表示交叉口，并以有向图边表示有向街道。道路网络最外围的边吸引访客的概率为$\frac{1}{336}$，而最内侧边的概率为$\frac{5}{336}$。随着位置逐渐接近中央商务区核心区域，每经过一个交叉口，吸引概率就均匀增加$\frac{1}{336}$。

为模拟车辆可能起源于中央商务区之外的情况，我们采用了不同的方法来定义车辆起点的分布。与最内侧边缘相比，最外侧边缘成为车辆起点的可能性高出9倍。其他边缘的概率与其到道路网络几何中心的欧几里得距离成正比。因此，车辆更有可能出现在道路网络的外侧边缘，驶向中央商务区中心，并在那里停车一段时间。之后，它们返回起始街道并离开仿真，见图6。

在每条边上，我们都在 Eclipse SUMO 中定义了停车区域。所有这些区域均提供15个与边本身平行的停车位，每个停车位长6.6米。[6]

我们假设市政府或停车运营商已经制定了停车定价方案。在该方案中，有两个停车区域；内部停车位的价格更高（停车价格为 1€ ），而外部停车场的价格更低（为0.5€），如图5所示。

为建模部分驾驶员不关心或无法顾及停车费的情况（例如快递员、技术工人、老年人或残障人士），我们根据人群中不同的 β 设置组合，定义了三种测量案例，见表1。例如，在MIX10 情况下，10%的驾驶员具有较小的 $\beta = 0.01$设置，更偏好距离较近的停车场，而不是较远的停车场；其余驾驶员则具有更中性的 $\beta = 0.5$ 偏好。在MIX10 情况下，我们可以模拟一个具有较高停车费用厌恶的人群，或模拟天气晴朗的夏日中的行为：此时人们更倾向于选择较低的停车价格，并愿意步行更长的距离。另一方面，MIX50代表的是偏好更舒适、但可能更昂贵的停车选项的人群，或不利天气条件下自然的人类行为。MIX25 情况介于前两者之间，其中相当一部分驾驶员并不在意停车成本。不过，他们远未达到人群的多数。

[6]目前，停车场中的事故建模和对操纵时间的考量尚不在本研究范围内；因此，停车位长度仅是一种视觉属性。

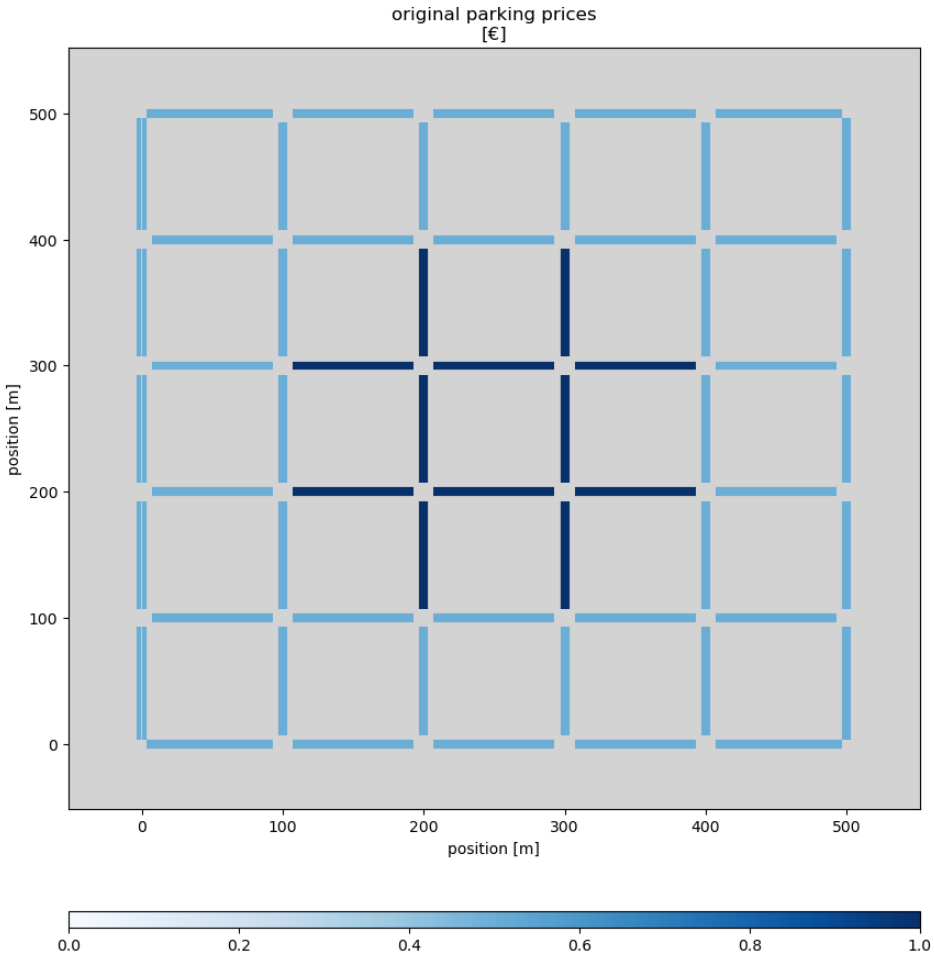


图 5：仿真场景中的道路网络和停车区域。颜色对应两个停车区域的原始停车价格。

4.3. 停车行为

为评估所提出的基于拍卖的停车分配系统的能力，我们如表2所示，采用了三个层级的停车引导系统进行实验：传统的基线系统不提供停车场占用信息，也不提供停车预约机会；信息系统提供实时停车场占用数据，但仍不提供停车预约。此外，我们还实现并测试了所提出的基于拍卖的停车预留系统。我们总共设置了 $3 \times (1 + 2 \times 4)$ 个仿真案例，用于在每种测量案例下分别测试各个系统。由于假定信息系统和基于拍卖的停车分配系统需要使用智能手机应用程序，我们在四个市场渗透率层级上对其进行了测试。

通过将拍卖与信息系统进行比较，我们可以观察到分配系统在不同渗透率下的优势。通过将信息系统与基准系统进行比较，我们可以了解简单的停车占用信息如何帮助驾驶员在其首选停车场内或附近找到空闲停车位。通过将拍卖系统与基准系统进行比较，可以评估同时采用动态停车

表1：不同测量案例中的总体定义。

测量案例	$\mathbb{P}(\beta = 0.01)$	$\mathbb{P}(\beta = 0.5)$
MIX10	0.1	0.9
MIX25	0.25	0.75
MIX50	0.5	0.5

表2：停车行为。

停车系统	实时停车占用信息	停车预约
基线	—	—
信息	✓	—
拍卖	✓	✓

定价方案。

4.3.1. 基线

按照经典的基线 行为，仿真车辆根据实际测量案例中的首选停车场，沿着从抽样起点到车辆目的地的路线行驶。然而，车辆并不了解停车场的信息，也没有预留停车位。因此，无法保证它们能在首选停车场找到空闲停车位。如果无法在该处停车，车辆便会开始巡游，如第 4.1 节所述。

4.3.2. 信息

我们还进行了仿真，以比较基于拍卖的预留与简单停车引导系统的优劣。为此，使用信息 系统的驾驶员会在出发前查看停车场占用率。使用此类系统时，他们可以按照数值从小到大的顺序遍历停车偏好列表，即 $c_{i,j}$ 值。新的车辆目的地将设为参与车辆出发时至少有一个空闲停车位的第一个 i 停车场。这种行为模拟了通勤驾驶员通常会在出发时查看停车位可用情况；也类似于停车引导系统在城市外围的交通标志上显示 P+R 停车场的空闲停车位数量。

由于该系统仍不提供停车位预订，因此车辆驶向某个原本空闲的停车位时，该车位有可能已被占用。如果驾驶员发现目标停车场已满，就会开始巡游，具体过程如第 4.1 节所述。由于我们模拟的是路边停车，因此假设驾驶员无法因交通状况而安全停车，并在离开后重新确认实际停车位占用情况，这一假设是合理的。自然，在极端情况下，也就是某个理想停车场只剩下最后几个空位时，多辆车可能会将其设为目的地。然而，实际上只有其中少数车辆能够占据这些最后的空位。其余车辆则必须继续巡游以寻找空闲停车位，这可能会造成轻微的交通拥堵。

4.3.3. 拍卖

我们还实现了第3节所述的基于拍卖的停车预约系统。我们安排拍卖在每15个仿真步之前运行一次，对应于15秒的时间段，即

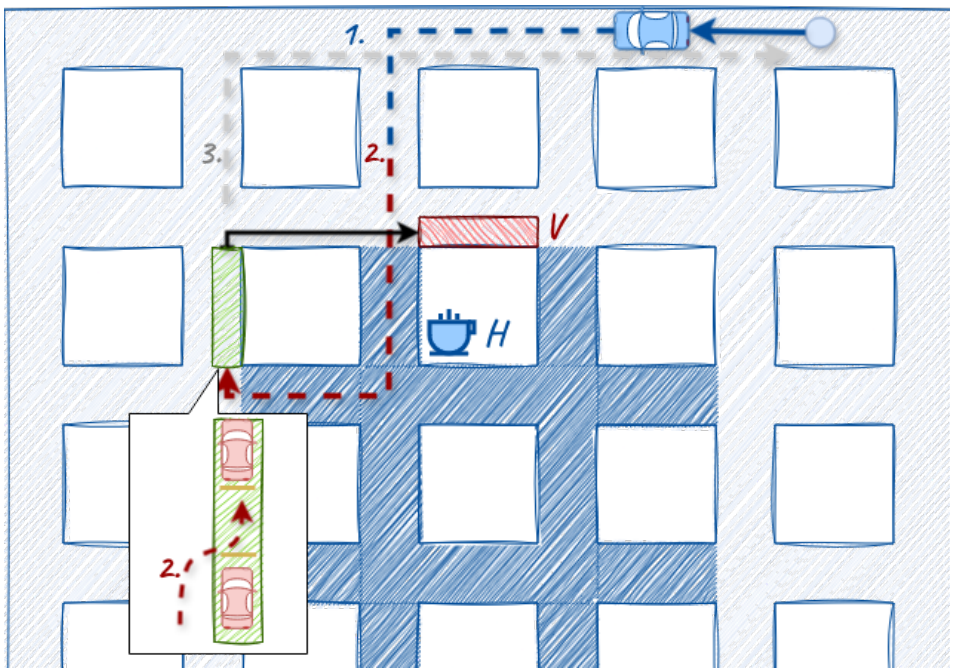


图6：仿真车辆行为示例。车辆在图中圆圈标记的位置进入仿真。驾驶员的实际目的地是正中心（H）的一家咖啡馆。由于该地点位于收费较高（颜色较深）的停车区域内，驾驶员（偏好值较高 β）选择前往较便宜区域内最近的停车场（V）。在基线方案和拍卖系统中，驾驶员开始驶向 V（1.）；使用信息系统时，如果 V 没有空闲停车位（某个特定停车场内有一处长 6.6 米的空闲车位），则可以选择前往另一个类似车位。在拍卖系统中，以 15 秒为一个周期时，驾驶员的（自动竞价代理）可以参与竞价并预订停车位，该车位不一定在 V，且可能会增加路线长度（2.）。停车后，车辆从其起点所在的街道驶离仿真（3.）。已占用车位与首选车位之间的停车距离以黑色箭头表示。

拍卖在每个$(15k)$步运行，$k \in \{0, 1, 2, 3, \dots\}$。在第$\big(15(k-1)\big)$步与第$(15k-1)$步之间出发的参与者，应参加在第$(15k)$个仿真执行步之前开始的拍卖。拍卖方法将车辆分配至停车场。为占用这些停车场，我们通过名为交通控制接口 TraCI 的接口，使用Python脚本将车辆重新规划路线至停车场。由于拍卖运行的时间段为15秒，并且相应地通过TraCI控制仿真，少量车辆会在进行此交互之前到达其原始目的地。因此，始终可能存在一些未参与车辆。根据我们的结果，在仿真场景中，路线短于15个仿真步的车辆仅占可忽略不计的1.5%。

因此，预留停车位始终有可能被未参与车辆实际占用。在这种情况下，参与车辆也会按照传统方法开始巡游，以寻找空闲停车位，参见第 4.1 节。

4.4. 仿真执行

我们以 1 秒为离散步长时间进行了仿真。我们针对信息和拍卖两种停车行为，分别测试了 6 种不同的渗透率，从 0%（基线）到 100%，步长为 20%。

我们将每种仿真情形重复运行了 10 次。车辆在固定随机种子的控制下，以 5 分钟的均匀随机出发偏移量离开。随机种子主要影响车辆的出发时间，因此会产生略有不同的仿真场景，使车辆与基础设施之间发生不同的交互。这样可以确保结果在统计上稳定且可复现。

4.5. 测量参数

为了评估所提系统的能力，我们在 Eclipse SUMO 仿真中测量了以下数值。

停车价格。在仿真中，车辆停车时，我们记录了驾驶员根据停车行为需要支付的停车价格。对于基线和信息系统，最终停车价格对应于停车区域内的停车价格。对于拍卖停车行为，如果驾驶员成功占用其预留停车位，停车价格即为拍卖中的中标价格。否则，与基线和信息情形类似，实际支付的停车价格由停车区域决定。

此外，在拍卖系统中，参与车辆和未参与车辆适用不同的停车定价方案。为了分析这一差异，我们还分别检查了这两组车辆的停车价格。此外，我们还统计了拍卖系统在不同市场渗透率下的成功预约率。我们预计，拍卖系统会缩小停车区域边缘的价格差异。

对个人而言，停车价格越低越好；然而，如果停车运营商的收入因此减少，他们就不会满意这种新型停车系统。

停车距离。借助 Eclipse SUMO 中的 TraCI，当车辆停下停车时，我们会检查实际占用的停车位与驾驶员原定车辆目的地（即其最偏好的停车地点）之间的距离，见图6。该距离表示从实际占用的停车位到最偏好停车位的行驶距离；由于这两点之间可能存在捷径或路径，因此该距离会高估步行距离。遗憾的是，Eclipse SUMO 无法模拟倒车或掉头。这一功能自然会进一步增加行驶距离。停车距离越短越好。

路线长度。车辆离开仿真时，我们会收集其路线总长度。巡游寻找停车位会显著增加路线总长度，因此可作为衡量停车系统效率的定性指标。路线长度相对较短则更好。

停车占用模式。仿真完成后，我们汇总各停车场随时间变化的占用情况，以得出道路网络中每条边的平均停车占用率。占用模式的显著变化表明，引入的停车系统改变了驾驶员的停车习惯，并可能带来不便，因为人类的目的地没有改变，仍集中在中央商务区的中心。此外，停车信息系统和基于拍卖的停车预约系统能够平衡各停车场的占用率，这很有利，因为它

表 3：不同市场渗透率下各测量案例和停车行为的数值均值。

		基线	信息					拍卖				
			20%	40%	60%	80%	100%	20%	40%	60%	80%	100%
MIX10	路线长度 [米]	553	564	570	574	579	585	564	573	577	579	583
	停车价格 [€]	0.604	0.620	0.617	0.611	0.603	0.592	0.623	0.624	0.627	0.632	0.641
	停车距离 [m]	125	116	111	110	115	128	115	103	88	70	49
	流量 [veh/h]	138.4	141.0	142.4	143.6	145.0	146.0	141.1	142.7	144.3	146.5	148.9
MIX25	路线长度 [m]	557	565	569	574	579	583	565	570	578	585	594
	停车价格 [€]	0.608	0.620	0.618	0.614	0.608	0.599	0.623	0.624	0.628	0.638	0.654
	停车距离 [m]	115	114	109	106	106	109	114	102	88	70	50
	流量 [veh/h]	139.0	141.2	142.2	143.5	145.1	143.6	141.2	142.6	144.6	146.7	148.9
MIX50	路线长度 [米]	557	564	569	574	579	584	565	570	577	584	593
	停车价格 [€]	0.614	0.620	0.619	0.617	0.614	0.611	0.624	0.628	0.637	0.660	0.697
	停车距离 [米]	115	118	112	106	100	97	114	103	87	71	51
	流量 [辆/小时]	139.1	140.9	142.2	143.7	144.9	146.3	141.4	142.7	144.5	146.6	149.0

缓解了某些停车场的超负荷情况，使车辆能够在首选街道上找到空闲车位。

交通流。 除了停车仿真之外，我们还可以在 Eclipse SUMO 中测量交通流。为此，我们在仿真网络的每条道路边缘上，距其下游端 40 米处布置了感应线圈交通检测器[7] 。这些检测器以 900 秒为周期提供交通流数据，单位为辆/小时（[辆/小时]）。为了简洁地呈现道路网络中的平均交通流，我们对整个仿真期间道路网络所有边缘上的交通流进行汇总。由于每个仿真案例都包含预热阶段和收尾阶段，因此我们截取并分析交通流模式中的稳态区段。较高的交通流意味着更高的网络通行能力，进而代表着更高效的交通系统。

5. 不同渗透率下的结果

仿真结果使我们能够分析在不同市场渗透率下，基于拍卖的停车分配如何影响交通系统和停车经济。总体而言，我们可以观察到，信息系统和基于拍卖的系统都能改善交通流，见表 3 和图 11。此外，基于拍卖的系统往往会推高价格，而信息系统则会使价格下降，见表 3 和图 7。

接下来，我们将考察不同渗透率如何影响测量参数。

5.1. 较低渗透水平

在较低渗透水平（$\leq$ 40%）下，各测量案例中的车辆路线长度仅略有增加，见图10和表 3。与此同时，根据图 9和表 3，无论测量案例如何，与基线情景相比，车辆都能停在稍微更靠近其首选停车地点的位置。

[7]更多详情请参阅 Eclipse SUMO 文档:
https://sumo.dlr.de/docs/Simulation/Output/Induction_Loops_Detectors_(E1).html

表4：在基于拍卖的停车分配系统不同市场渗透率下，参与驾驶员与非参与者在各测量案例中的平均数值结果。

		非参与者					参与者				
		0%	20%	40%	60%	80%	20%	40%	60%	80%	100%
MIX10	路线长度 [米]	553	558	558	557	559	585	589	590	591	594
	停车价格 [€]	0.604	0.626	0.631	0.638	0.644	0.609	0.612	0.619	0.629	0.641
	停车距离 [米]	124	123	119	112	105	86	80	72	61	49
MIX25	路线长度 [米]	557	559	559	558	560	587	5588	590	592	594
	停车价格 [€]	0.608	0.626	0.630	0.636	0.641	0.610	0.616	0.629	0.637	0.654
	停车距离 [米]	118	121	118	112	102	83	79	71	62	50
MIX50	路线长度 [米]	557	559	558	559	557	586	589	590	591	593
	停车价格 [€]	0.614	0.626	0.630	0.635	0.640	0.613	0.624	0.638	0.665	0.679
	停车距离 [米]	114	122	119	111	104	85	80	71	62	50

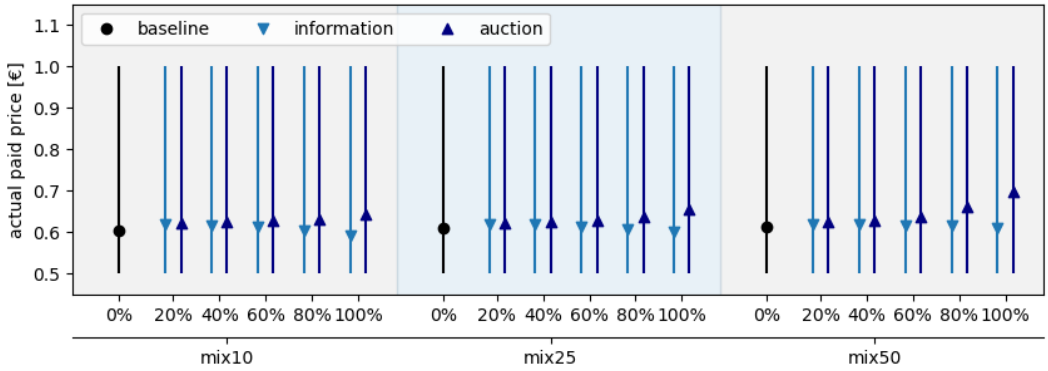


图7：不同测量案例、停车行为和市场渗透率下的停车价格。标记表示平均值，须线范围为第10和第90百分位数。

我们还可以观察到，采用基于拍卖的预约系统时，改善幅度略高。

如图 7和表 3所示，与基准行为相比，信息系统和拍卖系统都会推高停车价格。拍卖系统还体现了不同测量案例之间的差异；价格厌恶较低的驾驶员数量越少，增幅就越大。根据图 13，在低渗透率下，不同停车场的停车价格没有明显变化。然而，在低渗透率下，无论测量案例如何，参与驾驶员通常比非参与驾驶员支付更低的停车费用，见图 12a和表4。由于即使在低渗透率下，成功预约率也约为80%，见图 8，这种现象很可能是因为非参与驾驶员无法占用自己想要的停车位（很可能位于停车区域边缘）。相反，非参与驾驶员只能停在价格更高的区域，而参与车辆可以为自己预留更便宜的停车位。

然而，参与驾驶员采用拍卖系统后，即使在渗透率较低时，也能显著缩短停车距离；但路线长度会增加，见图12b.、图12c.和表4。路线长度增加是由于可能需要

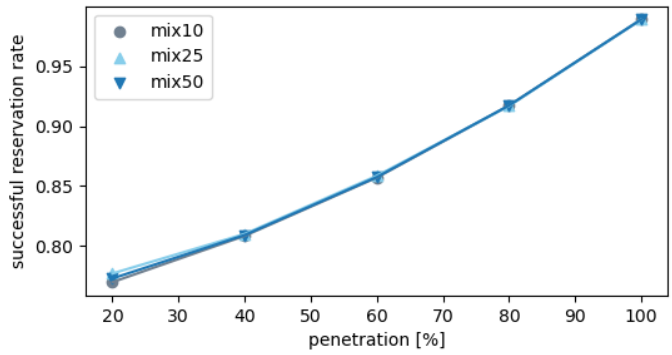


图 8：不同市场渗透率下，基于拍卖的系统中实体停车位预订成功率。

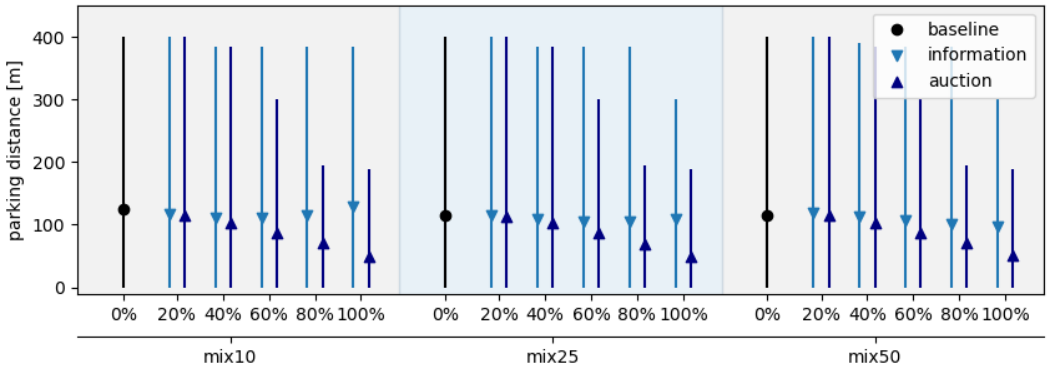


图 9：不同测量案例、停车行为和市场渗透率下的停车距离。标记表示平均值，须线范围介于第10和第90百分位数之间。

重新规划路线前往预留停车场，见图6。

在低渗透率下，与基线（0%渗透率案例）相比，信息系统和拍卖系统都能在整个道路网络中提供更均衡的停车占用模式，见图 14 和图 15。

另一个令人惊讶的效果是，即使在低渗透率下，在信息系统和基于拍卖的预约系统的每个测量案例中，交通流都有所改善，见图 11 和表 3。

5.2. 中等渗透率

在中等渗透率（40–80%）下，先前的趋势似乎仍在延续。在每个测量案例中，采用拍卖系统都会显著缩短停车距离，而信息系统带来的改善较小，见表 3 和图 9。根据图 8，这归因于预约系统约 90% 的成功率。

在拍卖系统下，停车区边缘的停车价格趋于一致，见图 13；从图 12a 可以看出，拍卖停车价格显著上涨。不过，具体情况取决于测量案例；参与者

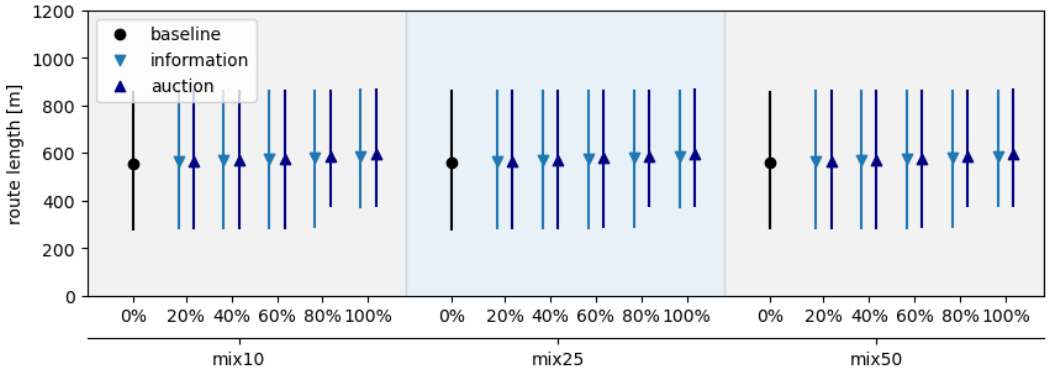


图10：不同测量案例、停车行为和市场渗透率下的路线长度。标记表示平均值，须线范围为第10和第90百分位数。

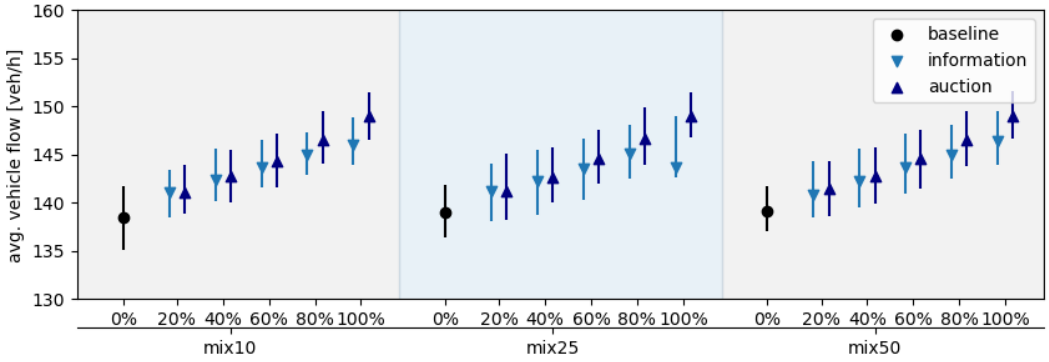


图 11：不同测量案例、停车行为和市场渗透率下的平均交通流。标记表示平均值，须线范围为第10和第90百分位数。

仍然可以找到比非参与者更便宜的停车场，见表4。有趣的是，在中等渗透率下，停车分配系统还有助于缩短非参与者驾驶员的停车距离，见图12b。考虑渗透率为40%的情况，非参与者的停车距离与基准情形相近；渗透率为60%时则有所改善。我们可以推测，如果至少50%的驾驶员使用预约系统，即使是非参与者，也更有可能占据自己偏好的停车位。

在中等渗透率下，与基准行为相比，拍卖和信息系统都能平衡道路网络中的停车场占用率，见图 14 和图 15。此外，根据图 11 和表 3，这两种系统都能显著改善交通流。

5.3. 高渗透率

在完全渗透率（80-100%）下，信息系统的表现可能会比渗透率较低时更差。这是由于第4.3.2节提到的影响：车辆出发时，信息系统会在特定

地点提示有空闲停车位，但车辆驶向这些地点时，车位却已被占用。这会造成轻微拥堵，尤其是在 MIX25 情景下；参见表 3 和图 11 中交通流量的下降。需要指出的是，交通流量仍高于基准行为下的水平。

此外，在完全渗透的情况下，信息系统几乎重现了道路网络中原有的（基线）停车占用模式，见图 14。结合 MIX25 情况下交通流的减少，这可能表明信息系统在某些情况下难以完成其任务。

关于基于拍卖的预约系统，其预约成功率超过 95%，见图 8；但由于拍卖运行的周期为 15 秒（见第 4.4 节），无法达到 100%。[8] 因此，停车价格也上涨了 7–14%，具体取决于测量案例，见图 7 和表 3。价格上涨，尤其是在 MIX50 情况下，还使原有两个停车区域边界处的价格梯度变得不那么陡峭，见图 13，同时也使停车占用模式更加均衡，见图 15。

根据表 3，渗透率为 100% 的基于拍卖的停车预约系统在每个测量案例中都最大程度地改善了交通流。

此外，与 MIX10 和 MIX25 情况下信息系统的最佳结果相比，拍卖系统的完全渗透仍可将停车距离减半，见表 3 和图 9；根据测量案例的不同，与原始基准行为相比，停车距离可减少 55–60%。

一个有趣的结果是，无论信息系统还是拍卖系统，都不会缩短路线长度。由于信息系统具有前文所述的特点，当其显示有空闲停车场时，可能会增加巡游，但在部分车辆到达之前，这些停车场可能已被占用。另一方面，对于基于拍卖的系统，路线长度增加是因为我们在拍卖完成后才对仿真施加影响。由于我们会将车辆重新规划至分配给它们的停车场，它们可能需要绕行才能到达这些道路，从而导致路线长度增加。不过，通过改进实现方式，例如缩短拍卖周期时间占车辆行程时间的比例，可以减少路线长度的增幅。

6. 结论

本文旨在填补研究空白，探讨从传统停车分配系统向智能的基于拍卖的停车分配系统过渡的各个方面。假设开发者将所提出的系统部署为移动应用，驾驶员可以自行决定是否使用该系统。由于参与用户与非参与用户的比例会影响交通状况和分配系统的性能，我们通过 Eclipse SUMO 仿真，在不同市场渗透率下测试了该系统。

随着渗透率的提高，这种新颖的系统能够显著提升交通流量。即使在渗透率较低时，也能看到明显改善；当只有少部分驾驶员参与

[8]在我们的仿真中，该系统的平均值达到 98.5%。

这种新颖系统时，这种改善也有助于缓解交通拥堵。与简单的停车信息系统相比，基于拍卖的停车位预订能够随着渗透率的提高持续带来改善。

我们假设非参与者驾驶员可能会占用一些已分配给参与者的停车位。然而，结果显示，即使渗透水平较低，参与者在大多数情况下仍能占用指定的停车场。除了拥有预留停车场外，在较低渗透水平下，参与者驾驶员支付的停车费也低于非参与者。这些优势很可能会吸引更多用户，从而进一步提高渗透率。

对于基于拍卖的分配，我们可能会预期实际支付的停车价格会上涨。然而，在我们考察的各种测量案例中，参与者的停车支出不仅超过传统成本 7–14%。另一方面，随着拍卖系统中的停车价格上涨，与简单信息系统中的停车价格下降形成对比，停车场运营商也会受到激励，进一步提高拍卖系统的市场渗透率，以增加收入。

总而言之，基于拍卖的停车分配系统解决了由市场驱动的停车定价这一百年难题。此外，该系统还为利益相关者带来诸多益处。我们得出结论：即使渗透率较低，该系统仍可投入运行；因此，实施和部署此类停车分配系统或许值得考虑。仿真结果表明，该系统有望获得可观的市场渗透率。然而，在部署之前，除了开发人员之外，停车运营商（即市政当局）也必须进行仿真，并根据具体情况评估结果，包括城市路网、经过校准的交通与停车模型，以及现实世界中的原始停车费。此外，还可以采用不同的拍卖偏好函数，这与我们当前的研究计划相似。为鼓励开展这些实验和测试，我们已在 GitHub 上发布项目：https://github.com/alelevente/penparking。

资助

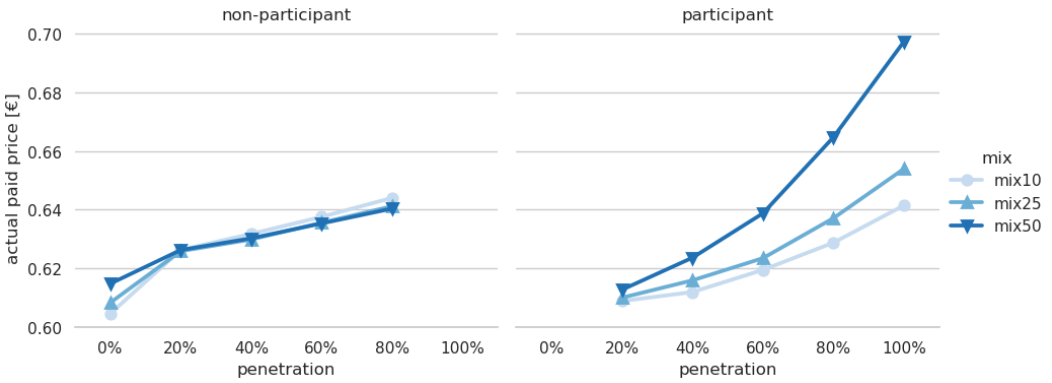
¨本研究得到项目编号 EKOP-24-3-BME-319 的支持。该项目由匈牙利文化与创新部通过国家研究、开发与创新基金提供支持，并依据 EKOP-24-3 资助计划实施；同时还得到项目编号 TKP2021-EGA-02 的支持。该项目由匈牙利文化与创新部通过国家研究、开发与创新基金提供支持，并依据 TKP2021-EGA 资助计划实施。

参考文献

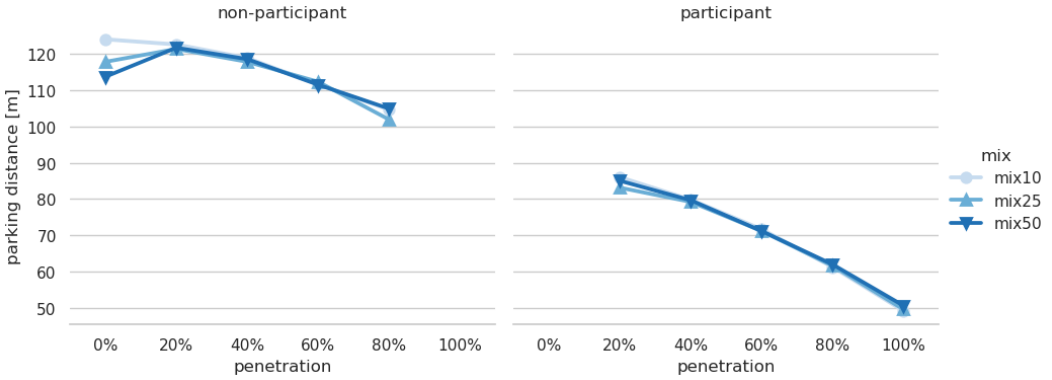
Alvarez Lopez, P., Behrisch, M., Bieker-Walz, L., Erdmann, J., Fl¨otter¨od, Y.-P., Hilbrich, R., . . . Wießner, E.（2018年11月）。使用 SUMO 进行微观交通仿真。载于 *2019 IEEE*智能交通系统会议（*ITSC*）（第2575–2582页）。IEEE。Anderson, S. P., & de Palma, A.（2004年）。停车定价的经济学。《城市经济学杂志》，*55*（1），1-20。取自 https://www.sciencedirect.com/science/ article/pii/S0094119003000779 Bansal, V., & Garg, R.（2005年）。具有离散出价增量的同时独立在线拍卖。《电子商务研究》，*5*，181–201。取自 https://doi.org/ 10.1007/s10660-005-6156-1

Chen, R., Gao, G., Pan, F., Liu, S., & Mao, X.（2024年）。基于拍卖策略的停车预约纵向公平性分析。《高级交通学报》，*2024*年（1），1470562。取自 https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1155/2024/ 1470562 Chen, Z., Yin, Y., He, F., & Lin, J. L.（2015年）。用于管理市中心路边停车的停车预约。《交通研究记录》，*2498*（1），12-18。取自 https://doi.org/10.3141/2498-02 Cheng, M., Inci, E., Xu, S. X., & Zhai, Y.（2023年）。私人停车位共享的新机制：具有尺度控制的维克里–克拉克–格罗夫斯拍卖。《交通研究*C*辑：新兴技术》，*150*，104106。取自 https://www.sciencedirect .com/science/article/pii/S0968090X23000955 Codec´a, L., Erdmann, J., & H¨arri, J.（2018年）。面向大规模智慧城市仿真的基于SUMO的停车管理框架。载于*2018 IEEE*车辆联网会议（*VNC*），*12*月*5*日至*7*日，台北，中国（第1-8页）。Demange, G., Gale, D., & Sotomayor, M.（1986年）。多物品拍卖。《政治经济学杂志》，*94*（4），863–872。取自 2024-12-16，网址：http://www.jstor.org/stable/ 1833206 Dowling, C. P., Ratliff, L. J., & Zhang, B.（2020年）。将路边停车建模为有限容量队列网络。《*IEEE*智能交通系统汇刊》，*21*（3），1011-1022。Hashimoto, S., Kanamori, R., & Ito, T.（2013年）。结合电力交易的基于拍卖的停车位预订。载于*2013 IEEE*第*15*届商业信息学会议，*2013*年*7*月*15*日至*18*日，维也纳，奥地利（第33-40页）。Huajun Chai, R. M., & Zhang, H. M.（2019年）。停车搜索：用于高效停车与交通管理的动态停车与路径引导系统。《智能交通系统学报》，*23*（6），541–556。取自 https://doi.org/10.1080/ 15472450.2018.1488218 Inci, E.（2015年）。停车经济学综述。《交通经济学》，*4*（1），50-63。取自 https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/ S2212012214000562（纪念Richard Arnott的集体贡献专刊）Khalid, M., Wang, K., Aslam, N., Cao, Y., Ahmad, N., & Khan, M. K.（2021年）。从智慧停车迈向自动代客泊车：综述、挑战与未来研究。《网络与计算机应用杂志》，*175*，102935。取自 https:// www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1084804520303921 Leclercq, L., S´en´ ecat, A., & Mariotte, G.（2017年）。路边停车搜索的动态宏观仿真：一种基于出行的方法。《交通研究*B*辑：方法论》，*101*，268-282。取自 https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/ S0191261516309717 Lin, T., Rivano, H., & Le Mou¨el, F.（2017年）。智慧停车解决方案综述。《*IEEE*智能交通系统汇刊》，*18*（12），3229-3253。Maranguni´c, N., & Grani´c, A.（2015年）。技术接受模型：1986年至2013年的文献综述。《信息社会中的普遍接入》，*14*，81–95。Meade, P. T., & Rabelo, L.（2004年）。技术采用生命周期吸引子：理解高技术市场的动态。《技术预测与社会变迁》，*71*（7），667-684。取自 https://www.sciencedirect.com/science/article/ pii/S0040162504000149 Ni, X.-Y., & Sun, D. J.（2017年）。用于评估停车预约系统影响的基于智能体的建模与仿真。《高级交通学报》，*2017*年（1）。取自 https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1155/2017/2576094 Ozioko, E. F., Kunkel, J., & Stahl, F.（2022年）。混合交通（有人驾驶和无人驾驶车辆）的道路交叉口协调方案：系统综述。载于 K. Arai（编），《智能计算》（第67–94页）。Cham：施普林格国际出版公司。Rizvi, S. R., Zehra, S., & Olariu, S.（2021年）。MAPark：一种多智能体基于拍卖的停车

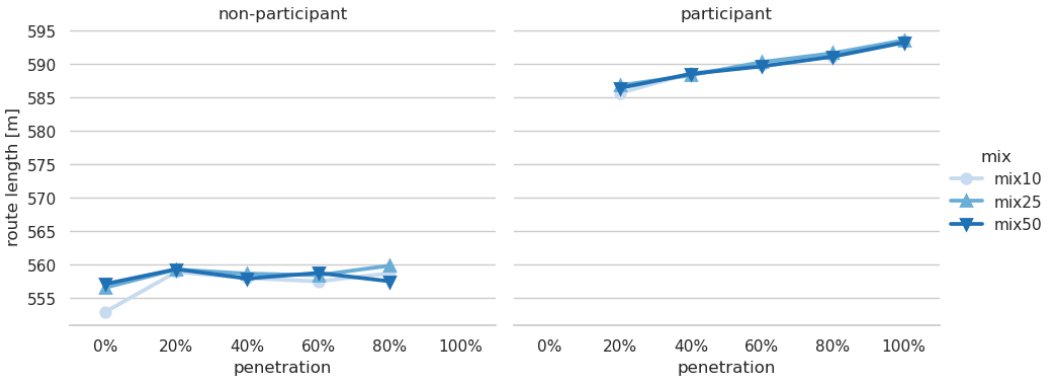
物联网系统。《IEEE智能交通系统杂志》，13(4)，104-115。Shoup, D.（2021）。路边停车定价。《交通研究A辑：政策与实践》，154，399-412。获取地址：https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/ S0965856421001105 Sidoti, O., Dawson, W., Gelles-Watnick, R., Faverio, M., Atske, S., Radde, K., & Park, E.（2024）。移动设备概况表。事实概况：技术采用趋势。皮尤研究中心，美国华盛顿。（https://www.pewresearch.org/internet/fact-sheet/mobile/（在线，访问日期：2025-01-29）Simi´cevi´c, J., Milosavljevi´c, N., Maleti´c, G., & Kaplanovi´c, S.（2012）。根据用户态度确定停车价格。《交通政策》，23，70-78。获取地址：https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0967070X12000935 Tan, B. Q., Xu, S. X., Kang, K., Xu, G., & Qin, W.（2021）。面向物理互联网（PI）赋能的停车管理系统的反向维克里拍卖。《国际生产经济学杂志》，235，108083。获取地址：https://www.sciencedirect.com/ science/article/pii/S0925527321000591 Vidovic, N., & Simicevic, J.（2023）。停车定价对出行方式选择的影响。《交通研究论文集》，69，297-304。获取地址：https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352146523001850（AIIT第三届交通基础设施与系统国际会议（TIS ROMA 2022），2022年9月15日至16日，意大利罗马）Waraich, R. A., Dobler, C., Weis, C., & Axhausen, K. W.（2012）。运用基于智能体的方法优化停车价格。《交通与空间规划工作报告》，794。（工作论文）Xiao, H., Xu, M., & Gao, Z.（2018）。共享停车问题：一种新颖的真实双向拍卖机制方法。《交通研究B辑：方法论》，109，40-69。获取地址：https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/ S0191261517306550 Yu, H., Jiang, R., He, Z., Zheng, Z., Li, L., Liu, R., & Chen, X.（2021）。自动驾驶车辆参与的交通流研究：假设、模型、推测与展望综述。《交通研究C辑：新兴技术》，127，103101。获取地址：https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0968090X21001224 Zhang, Y., Wang, C.-Y., & Wei, H.-Y.（2018）。采用智慧停车的停放车辆辅助车载雾计算系统：一种拍卖方法。载于*2018*年 *IEEE*全球通信大会（*GLOBECOM*），*2018*年*12*月*9*日至*13*日，阿联酋阿布扎比（第1-7页）。Zhang, Y., Wang, C.-Y., & Wei, H.-Y.（2019）。车载雾计算中用于停放车辆辅助的停车预约拍卖。《IEEE车辆技术汇刊》，68(4)，3126-3139。



(a) 停车价格。



(b) 停车距离。



(c) 路线长度。

图12：在不同测量案例中，采用基于拍卖的停车预约方法且市场渗透率不同的情况下，参与车辆和未参与车辆的各项结果。标记表示平均值。

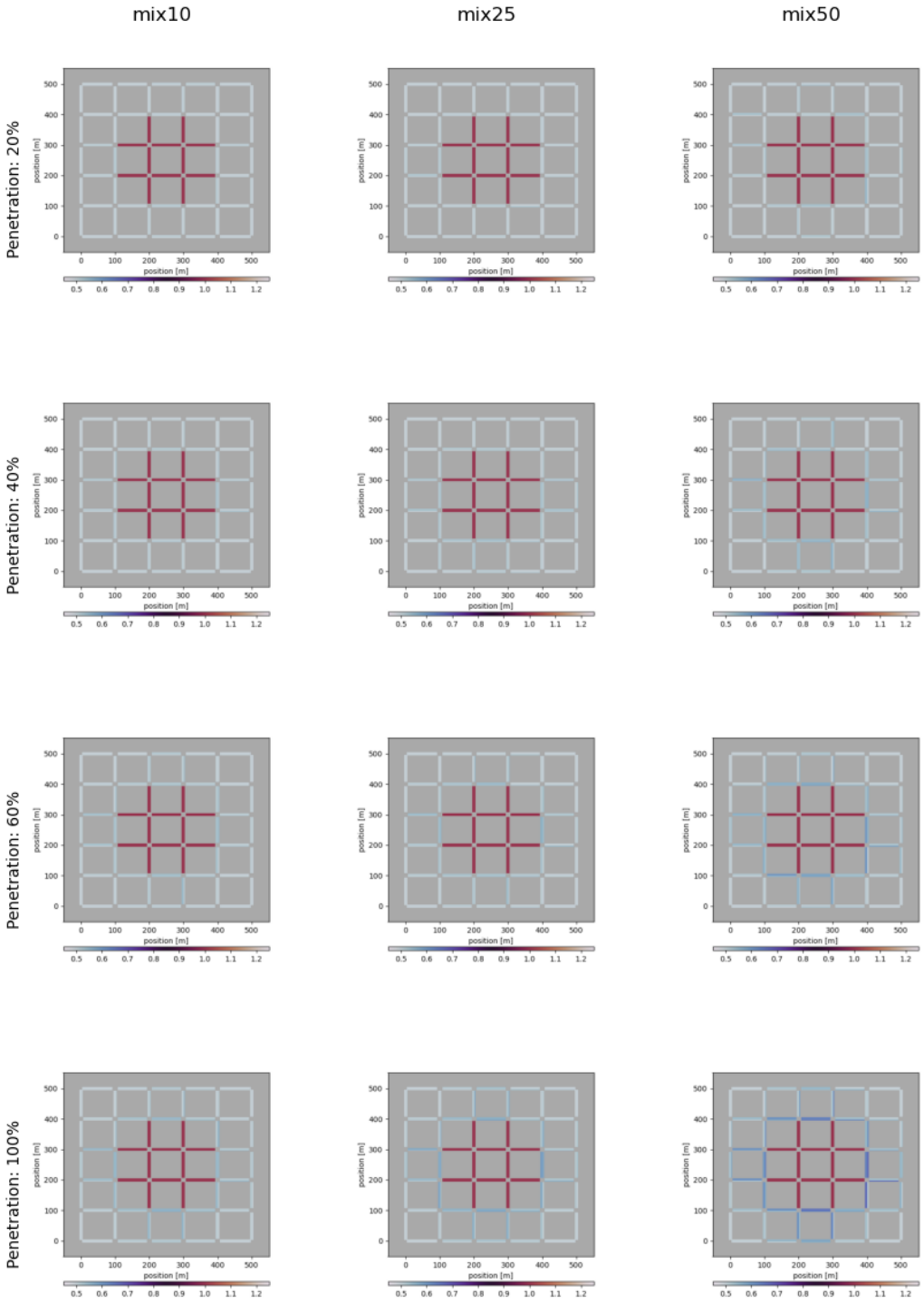


图 13：不同渗透率下拍卖停车行为的停车价格模式。较浅的蓝色对应较低的停车价格，红色对应较高的停车价格。

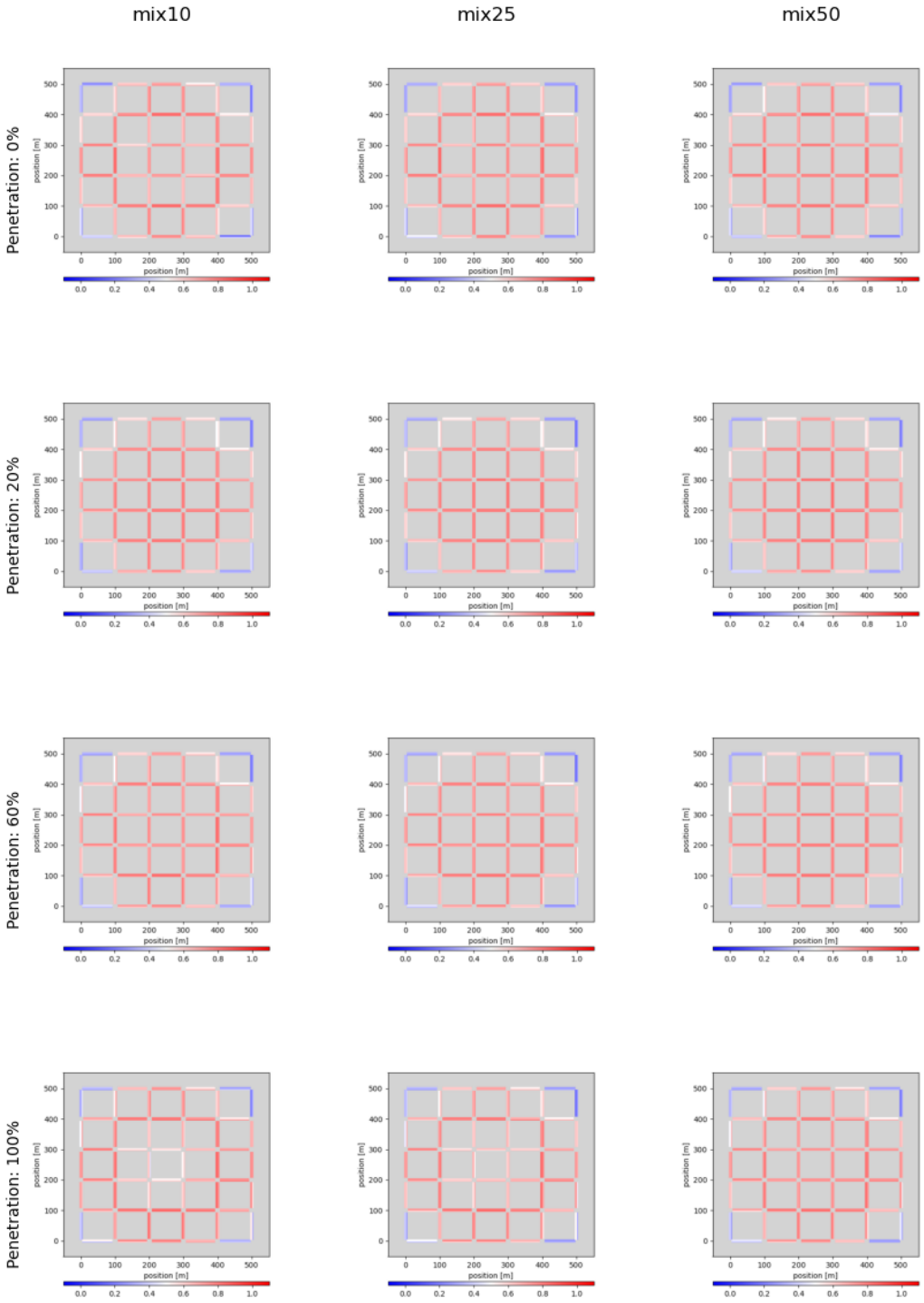


图 14：不同渗透率下信息系统停车行为的占用模式。红色表示较高的占用率，蓝色表示较低的占用率。

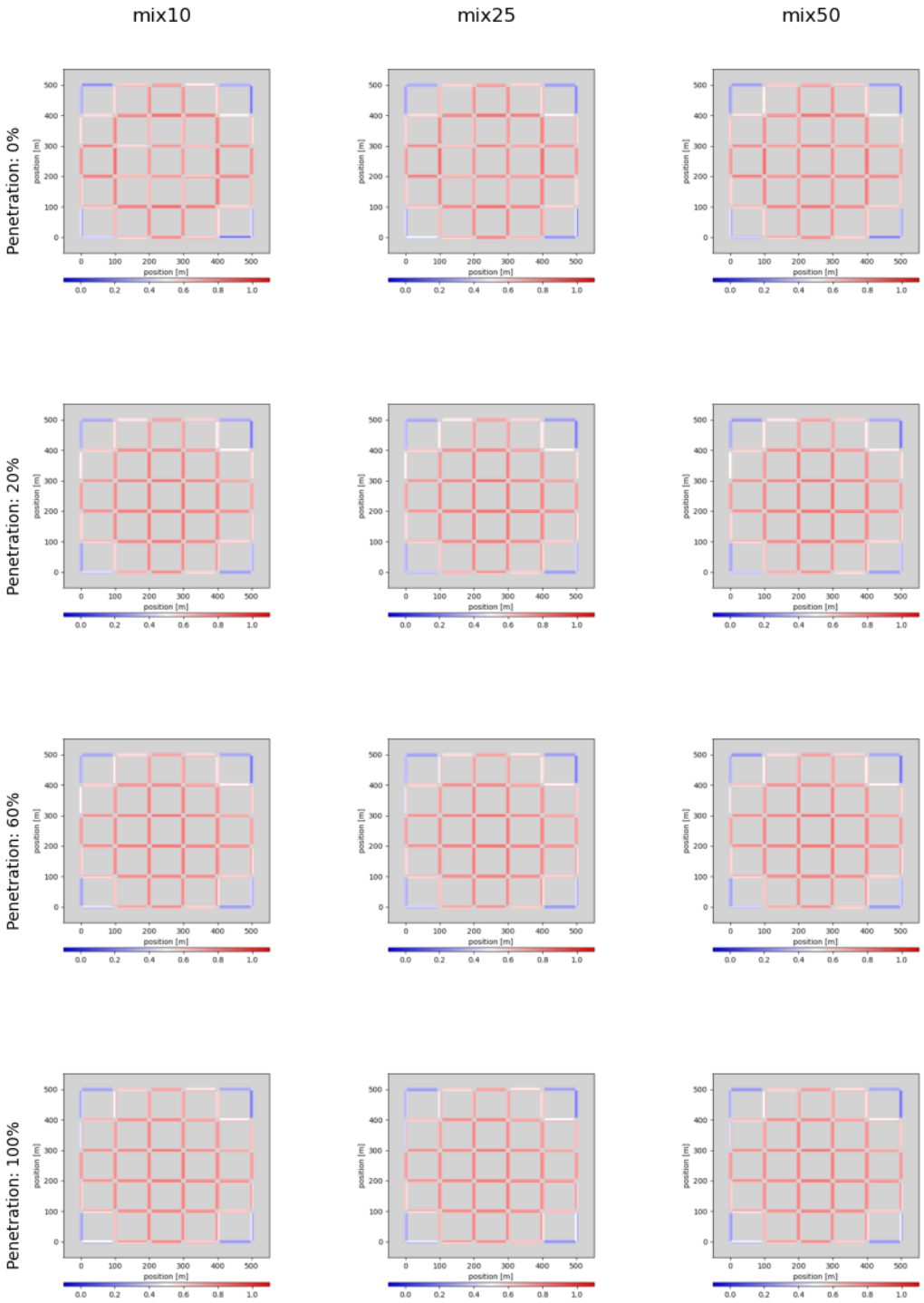


图 15：不同渗透率下拍卖停车行为的占用模式。红色表示较高的占用率，蓝色表示较低的占用率。