

1-20-2024

Intelligent Airport Crowd Management Technology Based on Digital Twin

Jinghui Zhong

School of Computer Science and Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510000, China, jinghuizhong@scut.edu.cn

Yutian Lin

Guangdong Airport Authority, Guangzhou 510000, China

Wenqiang Li

School of Computer Science and Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510000, China

Wentong Cai

School of Computer Science and Engineering, Nanyang Technological University, Singapore 639798, Singapore

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the [Artificial Intelligence and Robotics Commons](#), [Computer Engineering Commons](#), [Numerical Analysis and Scientific Computing Commons](#), [Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons](#), and the [Systems Science Commons](#)

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation. For more information, please contact xtfzxb@126.com.

Intelligent Airport Crowd Management Technology Based on Digital Twin

Abstract

Abstract: Given the need for intelligent emergency control and management of airport crowds, a smart control scheme for airport crowds based on digital twin is proposed. The scheme constructs an integrated crowd control system framework with four dimensions, including digital layer, modeling layer, functional layer, and application layer. It discusses and demonstrates the application effect of five important application modules. By using a data-driven crowd simulation model and intelligent optimization algorithm, the proposed scheme realizes the dynamic prediction and control optimization of the airport crowd status. The scheme can effectively improve the efficiency and intelligence level of airport crowd control and provide technical support for the construction of intelligent airports.

Keywords

digital twin, crowd simulation, crowd intelligent management, smart airport, intelligent optimization algorithm

Recommended Citation

Zhong Jinghui, Lin Yutian, Li Wenqiang, et al. Intelligent Airport Crowd Management Technology Based on Digital Twin[J]. Journal of System Simulation, 2024, 36(1): 27-38.

基于数字孪生的机场人群智慧管控技术

钟竞辉¹, 林育钿², 李稳强¹, 蔡文桐³

(1. 华南理工大学 计算机科学与工程学院, 广东 广州 510000; 2. 广东省机场管理集团有限公司, 广东 广州 510000;
3. 南洋理工大学 计算机科学与工程学院, 新加坡 639798)

摘要: 针对机场人群应急管控和管理智能化的需求, 提出基于数字孪生的机场人群智慧管控方案。构建了包含数据层、建模层、功能层和应用层四维度的一体化人群管控系统框架, 并对5个重要应用模块进行了探讨和应用效果展示。该方案通过利用数据驱动的人群仿真模型和智能优化算法, 实现机场人群状态的动态预测和管控优化, 能有效提升机场人群管控的效率和智能化水平, 为建设智慧机场提供技术支持。

关键词: 数字孪生; 人群仿真; 人群智慧管控; 智慧机场; 智能优化算法

中图分类号: TP391.9 文献标志码: A 文章编号: 1004-731X(2024)01-0027-12

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.22-0996

引用格式: 钟竞辉, 林育钿, 李稳强, 等. 基于数字孪生的机场人群智慧管控技术[J]. 系统仿真学报, 2024, 36(1): 27-38.

Reference format: Zhong Jinghui, Lin Yutian, Li Wenqiang, et al. Intelligent Airport Crowd Management Technology Based on Digital Twin[J]. Journal of System Simulation, 2024, 36(1): 27-38.

Intelligent Airport Crowd Management Technology Based on Digital Twin

Zhong Jinghui¹, Lin Yutian², Li Wenqiang¹, Cai Wentong³

(1. School of Computer Science and Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510000, China; 2. Guangdong Airport Authority, Guangzhou 510000, China; 3. School of Computer Science and Engineering, Nanyang Technological University, Singapore 639798, Singapore)

Abstract: Given the need for intelligent emergency control and management of airport crowds, a smart control scheme for airport crowds based on digital twin is proposed. The scheme constructs an integrated crowd control system framework with four dimensions, including digital layer, modeling layer, functional layer, and application layer. It discusses and demonstrates the application effect of five important application modules. *By using a data-driven crowd simulation model and intelligent optimization algorithm, the proposed scheme realizes the dynamic prediction and control optimization of the airport crowd status. The scheme can effectively improve the efficiency and intelligence level of airport crowd control and provide technical support for the construction of intelligent airports.*

Keywords: digital twin; crowd simulation; crowd intelligent management; smart airport; intelligent optimization algorithm

0 引言

随着经济全球化发展和人民生活水平的提高, 航空运输已成为现代综合运输体系的重要组成部分。国内机场的数量和机场旅客的吞吐量呈迅速

增大之势。据《2021年全国民用运输机场生产统计公报》, 截至2021年, 我国境内的运输机场数量已达248个, 其中旅客吞吐量在一千万人次以上的运输机场有29个。机场规模和人流量的增大

收稿日期: 2022-08-23

修回日期: 2022-12-09

基金项目: 国家自然科学基金(62076098); 广东省引进创新创业团队项目(2017ZT07X183); 国际合作科研项目(G2022163008L)

第一作者: 钟竞辉(1982-), 男, 教授, 博士, 研究方向为计算智能、机器学习与多智能体仿真。E-mail: jinghui.zhong@scut.edu.cn

为机场的人流管理带来了巨大的挑战。为适应现代机场的发展，我国民航局于2020年初出台了《中国民航四型机场建设行动纲要(2020—2035年)》，提出了建设“安全高效、绿色环保、智慧便捷、和谐美好”的四型机场的要求。实现机场人群智慧管控有利于提高机场的安全性、便捷性与和谐性，是建设四型智慧机场的重要内容，切合我国机场建设的战略发展方向。

近年来，学术界提出了一系列探索机场人群智慧管控的技术。其中，张雷指出，数字孪生机场是智慧机场的起点^[1]。数字孪生技术作为第四次工业革命的关键核心技术之一，在供应链管理、产品研发、故障预测和维护、智能制造、智慧城市等领域具有重要应用。其核心思想是实现世界实体在虚拟空间里的数字化映射，进而实现在虚拟空间里模拟现实世界里的实体在一定条件下的动态变化的目的。然而，当前机场数字孪生技术的主要专注于飞机与设备的智慧管理^[2-6]，对机场人群的智慧管控还有待深化和实践。

随着机场管理信息化的推进，目前大部分机场的视频监控已经可以实现对机场重要区域(如出入口和安检口等)的全覆盖。工作人员可以根据视频监控画面，发现异常行为，并采取相应的措施维护机场秩序。然而，现有的机场人群管控仍主要依赖于人工监视的方式，依赖工作人员的经验 and 主观判断，缺乏对机场人群未来状态的推演预测能力，其智能化水平仍有待提高。

针对上述社会需求和研究现状，本文对现有的数字孪生技术和人群管控技术进行综述，讨论现有技术的特点及其发展状况；提出一套基于数字孪生的人群智慧管控技术方案，并对方案涉及关键技术和功能应用等方面进行探讨和应用效果展示。

1 研究现状

数字孪生即物理产品虚拟的、数字的等价克隆体，是一组在微观与宏观层面都能完整描述物理产品属性的信息集^[7-8]。早期的数字孪生只是一

个有趣的概念，因其所需的数据量尚无法得到满足。随着物联网和传感技术的发展，数字孪生技术也获得了快速的发展，目前已成为一个充满前景的工业制造方向。数字孪生的概念模型主要分为3部分：真实空间的物理产品、虚拟空间的虚拟产品以及二者之间的信息流。数字孪生可以帮助使用者直观地同时查看物理和虚拟产品的信息，而不是在繁杂的数据中依赖经验判断当前情况。数字孪生还允许多人在不同地方实时查看相同的虚拟产品属性，实现完全的信息共享，有助于集合众人的智慧共同决策。然而，现有的数字孪生相关研究主要关注对物理对象的反映，鲜有通过对虚拟对象进行仿真推演实现对物理对象实施反馈的研究。

在人群行为建模与分析方面，近年来已有研究者提出了一些有效的方案。这些方法大致可以分为模型参数优化方法、行为模式发掘方法和行为规则挖掘方法3类^[9]。参数优化方法基于数据调优人群行为模型的参数，使得模型产生的仿真结果更可靠。比如 Wolinski 等^[10]提出利用带局部搜索的遗传算法对常用的人群行为模型进行参数校准。模式挖掘方法旨在从大量数据中找出行人行为模式。比如，文献[11-12]利用聚类的方法挖掘行人的行为规律。Lerner 等^[13]提出一种基于数据驱动的人群行为建模方法。该方法预先从视频数据中提取行人移动的轨迹片段作为模式库。在仿真中，当个体到达当前轨迹片段的终点或者遇到异常情况时，个体将从模式库中选择新的轨迹片段更新后续的行为。相比模式挖掘方法，规则发现方法所得的行人行为规律更加通用，它们通常用解析式来表征人群的行为规则，并利用演化算法从视频数据中挖掘出适用的行为规则。比如，Chen 等^[14]分析机场旅客特性、商店吸引力、视觉距离等乘客属性以及行为特征，构建乘客的购物行为模型，并通过基于代理的仿真模型来校准和验证行为模型。上述技术主要专注于产生可靠的人群行为仿真结果，它们也可以与数字孪生技术

相结合, 应用在包含机场的公共场所人群智慧管控中, 帮助管理者预测人群演变态势。人群行为模型还可以应用于辅助管控大型场所的人流。比如, Zhong等^[15]将人群行为模型与演化算法结合, 实现大型场所的人流护栏摆放优化。Park等^[16]在A*算法以及RVO2仿真模型^[17]的基础上, 提出了一个人群控制策略框架系统用以帮助警察部署人群管控策略。Feliciani等^[18]则用基于元胞自动机模型的仿真来评估人群管控的效果。

在机场的人群管控方面, 现有的研究可分为数据分析类与模拟仿真类。数据分析类的方法专注于利用机器学习技术从数据中学习正常或异常的人群行为特征。比如, 邵荃等^[19]提出了机场航站楼群体性事件预警方法, 该方法通过分析案例库中的异常聚集人群的特征来构建预警规则。Zheng等^[20]基于毕达哥拉斯模糊深度玻尔兹曼机方法, 开发并训练深度学习网络, 从而对机场中的正常乘客和潜在危险分子进行分类。模拟仿真类的方法专注于结合机场人群密集场所的信息进行机场行人仿真, 并根据仿真所得的人群动态设计管控措施。比如, 张龙财等^[21]在仿真软件的辅助下, 对疏散的风险因素进行了模拟研究, 并给出相应的改良方法。

目前数字孪生在机场人群管控方面的应用较少, 且缺乏预测能力。其主要应用集中在设备、场景可视化的层面上, 侧重于对物理世界的反映。使用者需要根据已有的状态和参数信息, 利用自身的经验和判断, 做出决策和制定方案。这种依赖经验的管控方案, 不仅比较耗时, 而且资源的分配使用可能达不到最优的效果, 限制了系统的性能。因此, 如何将数字孪生与人群行为建模技术结合, 对机场的人群行为进行态势演变预测和智能化管控仍然是一个亟待研究的课题。

2 基于数字孪生的人群智慧管控方案

在学术界, 已有一些研究者提出了面向特定

应用领域的数字孪生框架。文献[22]针对数字孪生的3个基本要素——物理实体、虚拟实体以及虚实之间的交互, 将数字孪生分成物理层、虚拟层和信息处理层, 提出数字孪生的3层实现框架。文献[23]提出按照数据采集到应用分为数据保障层、建模计算层、数字孪生功能层和沉浸式体验层的4层模型。本文基于已有的框架和模型的特点, 提出了基于数字孪生的机场人群智慧管控的系统框架(如图1所示), 从数据层、建模层、功能层、应用层4个维度进行探讨。

数据层是整个数字孪生框架的基础, 也是连接物理世界和虚拟世界的重要纽带和桥梁, 可以从数据操作和数据管理两个方面进行分析。数据可来自硬件、软件或者网络^[24]。硬件数据例如条形码、二维码、射频识别设备(radio-frequency identification, RFID)、摄像头、传感器等。软件数据可以通过软件应用程序编程接口(application programming interface, API)和开放的数据库接口收集。网络数据可以通过网络爬虫、搜索引擎和公共API Internet收集。数据操作主要包含数据采集、数据管理、数据传输3种。数据采集需要保证数据的实用性、实时性、容错性。从机场获取的数据类型可以包含多种类型的数据, 例如机场的物理平面图数据、视频监控数据、机场的航班安排信息、工作人员排班信息等, 这些来自物理世界的文本、图像视频等类型的数据反映机场内部的空间、时间等信息, 是搭建模型的基础数据来源。当前的数据采集主要通过可靠传感器和分布式传感网络进行获取^[23,25]。为对物理实体进行精确的反映和准确的控制, 采集设备通常需要具备高响应和低时延的特性。此外, 当存在分布式的设备时, 还需要考虑设备之间数据的同步问题。数据传输收集从不同设备上获取到多种类型的数据, 为保证数据传输质量与降低拥塞, 存在两种类型的数据传输方案。一种是降低数据传输量。比如, 文献[26]采用AutomationML描述数字孪生系统的属性, 通过在高层次上对物理组件的描述从而降

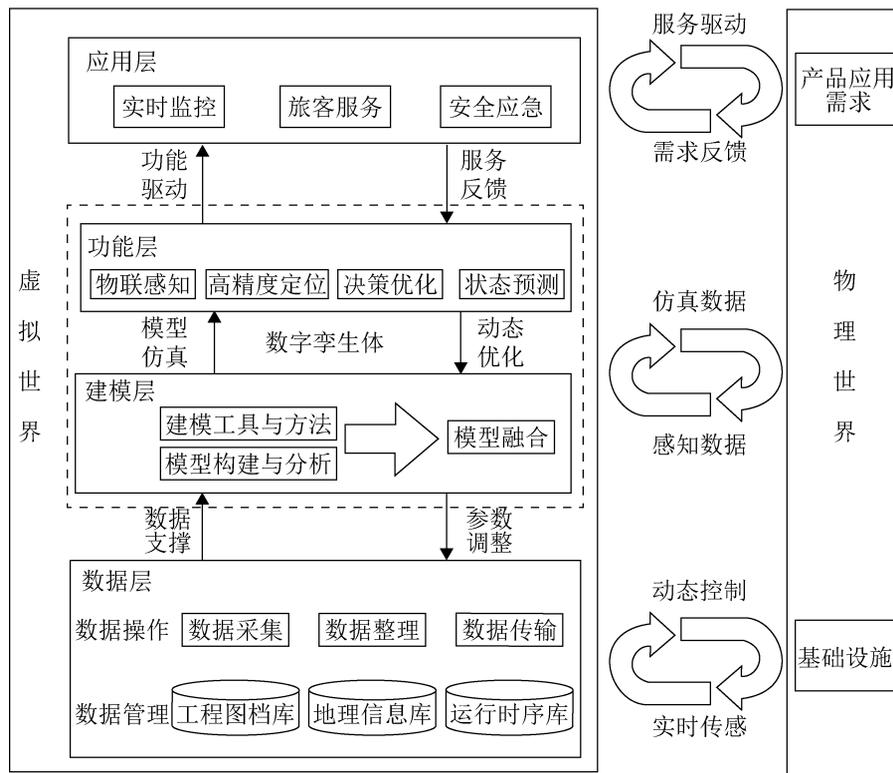


图 1 基于数字孪生的机场人群智慧管控系统框架

Fig. 1 Framework of intelligent airport crowd control system based on digital twin

低数据传输的规模。另一种是通过压缩数据或提高资源利用率(比如压缩感知技术^[27]),使相同大小的数据能够携带更多的信息,同时保证数据传输效率。数据处理主要对数据进行预操作。由于数据源本身存在多源、异构、多尺度和高噪声特点,以及数据在传输过程中会出现差错的原因,采集的数据通常存在数据缺失、冗余和错误的现象。因此,需要利用机器学习技术对数据进行清洗^[23,28]。此外,由于数据的海量性以及多样性,需对采集的数据进行管理融合。

建模层则充分利用数据层的数据,通过建模工具和建模方法,对系统建立多尺度的模型,从而为实现功能层的技术提供平台基础和分析条件。可以利用精细化建模与仿真技术,从几何、功能和性能等方面对物理实体进行考察,并通过跨领域多学科融合、连接不同时间、空间物理过程构建虚拟模型,从而精确地刻画出物理实体的特性。数字孪生建模通常有比较强的专用性,即不同的

应用需要不同的开发环境和建模方法。从工具或环境角度,可选择通用建模语言 UML、SysML 以及 XML 等^[29],并在 CAD、Matlab、Revit、CATIA 和 Anylogic 等软件平台基础上构建模型。从方法论角度,可以采用的建模方法包括面向基础建模、面向建筑信息模型建模 (building information modeling, BIM)、面向产品生命周期管理建模 (product lifecycle management, PLM)^[30]等,用以实现对多实体,长周期系统的建模。除了对物理实体进行对应的准确映射,在机场人群管控应用中,仿真模型涉及建筑实体、属性实体、行为实体等物理实体,因此涉及的子模型数量较多,需要考虑不同子模型之间的交互连接。数据模型融合技术为解决这一问题提供了思路。可以通过利用遗传算法、深度学习和强化学习等机器学习技术分析和挖掘数据,实现跨模态数据融合驱动的仿真建模技术。

功能层为实际的系统设计、生产、运营、使

用、维护等需求提供基于应用的接口,是数字孪生系统价值的直接体现。功能层进一步提供对数字孪生体和物理实体之间的交互与协同,使得数字孪生体能够通过分析、推演和控制等操作实现对物理实体的反馈,是数字孪生体的“大脑”。具体地,功能层可提供物联感知、高精度定位、决策优化和状态预测等功能。物联感知和高精度定位要求数字孪生体能够真实的描述以及呈现出物理实体的状态。通过3R(VR、AR、MR)技术将构建的三维模型与各种输入输出设备进行连接,采集物理实体状态和位置等物理信息,作用于人的感官系统,使得使用者能够复现真实系统的场景。决策优化是数字孪生系统通过仿真、分析和推演物理实体的状态变化过程,为系统的状态管理优化提供指导和评估的依据,克服传统主要依赖于经验决策的局限性,从而提升系统管理效率以及避免人力资源的浪费。状态预测通常根据历史数据和当前系统运行的状态对物理实体的未来的运行状态进行预测,能够对系统中可能存在的隐患进行排查,从而能够及早的发现问题。

应用层面向具体的应用和需求场景,是整个数字孪生系统价值的外在表现。针对机场人群管控应用的具体需求,应该建立不同的业务场景服务,使其充分发挥作用,主要包括实时监控、旅客服务、安全应急。机场内部环境较为复杂,其中涉及不同功能区域的管理,同时机场内部乘客数量的密集性和行为的不确定性,均会导致机场大厅人群管控的困难性。因此,对于机场内部各个区域内部的动态实时监测是很有必要的,真实空间的产品状态和个人行为,通过传感数据的检测,最终被反映到虚拟三维空间中,并通过3R技术进行实时显现。旅客作为机场服务的核心主体,其出行体验的好坏是反映机场服务能力的重要评价指标。旅客在机场中通常会经历安检、值机、登机、换乘、行李托运等业务流程。在这些过程中,机场管理部门需要做到节省旅客时间,提升服务质量。人群数字孪生系统可以分析旅客的行

为特点,从而进一步优化区域功能布局,同时,可以提供人流引导方案,并通过感知用户当前位置,为旅客提供二维或者是三维的机场交通路线指引。机场内部是人群密集的大型场所,其安全性问题不容忽视,包括潜在的产品安全问题,以及不确定性的乘客安全问题。数字孪生系统通过建立可视化安防监控平台对机场各类安防资源可视化,利用人脸识别、视频识别、人流量识别、行为检测技术,实现机场公共安全的全风险判别,从而及时安排人力物力资源进行应对。

基于数字孪生的人群智慧管控体系的最终目标是实现对产品和行为的整个生命周期的监控以及系统设计和生产过程的改进,其通过数据层、建模层、功能层以及应用层4层模型的不断迭代,以及与物理世界的实际需求和物理实体的交互反馈使得服务对象能够获得良好的体验,同时使决策者能够根据服务对象的行为特点做出合适的决策,从而实现资源的有效利用,达到节省成本、提高效率、提升服务质量的目的。

3 机场人群智慧管控关键技术与功能应用

本节将探讨和分析在机场人群管控方面的核心技术与功能应用,并展示一些重要模块的实践效果。对于机场人群管控,其核心主体为乘客。在乘客进行机场业务处理过程中,会涉及到乘客与周围环境的交互,以及其自身的属性和行为。因此,为对物理空间有一个较为精确的映射,至少应从机场环境、乘客属性、活动行为3个方面进行分析。机场环境是乘客活动的空间,乘客在其中完成所需的各种服务,包括购票、安检、值机、行李托运以及其他活动。乘客属性一般包括位置、状态等信息,而活动行为则描述乘客自身与机场环境的交互。从数字孪生的基本框架出发,首要环节便是针对数据的处理分析。为了保证数据的规范,以及响应的及时、准确,系统需要融合分布式控制、多型号异构监控技术以及高性能

并行运算等技术对数据进行采集和融合。在获取的物理空间数据的基础上,可以通过建模方法以及其他数字化技术构建虚拟空间数字孪生体模型,并通过与物理世界的交互与分析,不断调整和优化模型的参数,使得模型能够动态反映机场内部的实体,实现一个反馈准确且响应及时的平行仿真系统。进一步地,为解决机场的实际需求(例如,如何优化机场内部人力物力资源的配置以提

高机场的运行效率和减少乘客的等待时间等),机场人群数字孪生系统应该具备“智能”的特点。这就要求系统不仅能够动态感知外部世界的变化,还应对物理世界进行推演分析,对物理世界的未来变化趋势进行预测,并为机场管理人员提供决策建议,以便优化资源管理和提高效率。接下来将对其中涉及到的关键技术以及应用进行进一步的阐述。机场人群智慧管控关键技术如图2所示。

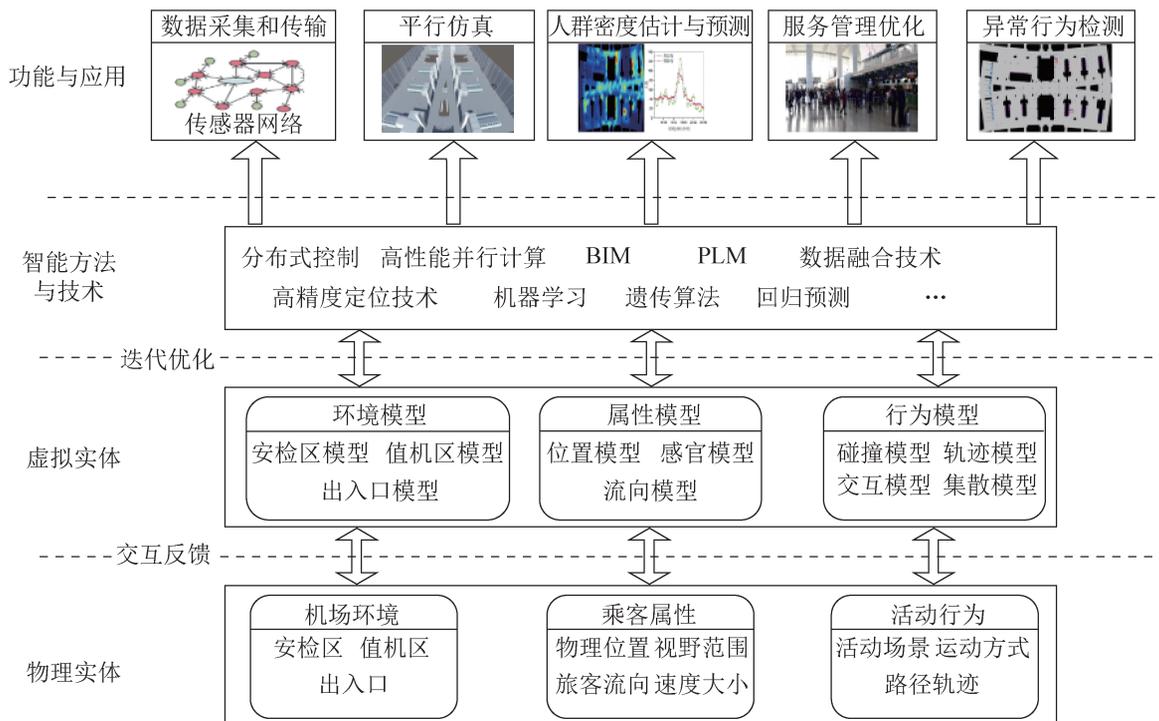


图2 机场人群智慧管控关键技术
Fig. 2 Key technologies of intelligent airport crowd control

3.1 数据采集与传输

数据支撑起了整个数字孪生上层体系,在整个系统的构建、运营、维护的整个生命周期中发挥着重要作用。为了管理机场内部的乘客和设备等实体的运行状态,需要对物理世界形成精确的感知,因此需要采集机场环境下的多种数据。数据的来源包括工程图纸、实时视频监控、航班信息等,涵盖了结构化以及非结构化数据信息。另外,在实际场景中,数据具有多样性和高噪声特点,而且由于物理传感设备的问题,数据具有精

度不一致以及数据缺失的问题。因此,在这个过程中,系统需要先进行数据处理与分析,才能开展模型的构建。

数据的采集过程需要尽量确保数据的准确性和完整性。可通过利用高精度的采集设备和多源异构的传感设备提升数据的准确性和完整性。比如,目前机场通常采用不同型号的摄像头以获取不同分辨率和特性的图像,从而支撑人群密度估计和人脸识别等不同应用。由于通过设备采集到的多种类型原始数据通常具有多样性和高噪声性的特点,采集的数据需要进行数据融合处理。比

如, 针对不同数据类型建立数据库, 规范数据的存储方式, 同时利用智能算法对数据进行清洗和规范化。此外, 对于机场大型环境下, 数据采集设备呈现分散排列, 可以利用分布式计算技术提升数据采集效率^[31-32], 从而提升整个系统的响应速度。

3.2 人群行为平行仿真

人群行为平行仿真系统旨在产生与现实世界并行的数字化人群行为仿真。由于人群行为具有高度随机性, 而且传感数据存在时延和误差的局限性以及人群行为模型自身存在误差的局限性, 人群行为平行仿真系统通常只能产生与现实世界近似的仿真结果。在机场航站楼场景下, 为构建一个有效的仿真系统, 需要包含对环境以及行为主体的建模, 此外, 还需要考虑两者之间的交互。环境实物模型包含值机区, 问询区, 安检区和出入口通道等。行为主体的模型则主要涉及出行乘客以及机场的管理工作人员的模型。这些模型的参数可通过分析动态检测的数据获得。比如, 出入口通道模型的人流率参数以及安检口模型的安检速度可通过分析视频监控数据动态获得。通过融合环境实物模型和行为主体模型可实现对人群行为整体态势变化进行推演和预测, 建立可靠的平行仿真系统。在此基础上, 也可以将平行仿真系统与智能优化算法结合实现机场的布局设计优化和资源调度优化等。

基于智能体的建模技术是实现复杂人群行为仿真的主流方法, 其通过设定智能体与环境以及智能体与智能体之间的交互规则, 并对环境和模型设置合适的参数(比如人流率和人流移动速度等), 实现对复杂场景中的人群行为演化仿真。机场环境下, 通常可以实时模拟人群的集散行为, 出入口旅客、工作人员、物料等进出过程, 监控旅客轨迹, 进一步地实现对人群聚集趋势以及流向的预测。模型产生的人群状态演变数据与2D或3D可视化开发引擎结合可以实现人群行为仿真结果的可视化。图3所示为基于社会力模型和Unity开发引擎实现的广州白云国际机场T1航站楼人群

行为仿真可视化效果。

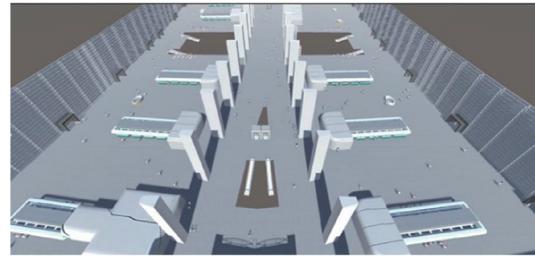


图3 广州白云国际机场T1航站楼人群行为仿真效果图
Fig. 3 Simulation of crowd behavior in terminal T1 of Guangzhou Baiyun International Airport

3.3 人群密度估计和数量预测

人群密度估计的目标是通过分析监控摄像头获取的监控视频产生人群密度热力图, 使管理者及时准确感知整个场所的人流密度状态, 辅助管理者做出相关的人群管控策略。目前, 人群密度估计方法主要有3类^[33-34]: 基于检测的人群密度估计技术、基于特征学习与回归技术的人群密度估计技术和基于深度学习的人群密度估计技术。基于检测的人群密度估计使用滑动窗口来检测场景中的人群, 并统计人数。此类技术可进一步分为基于整体检测方法与基于部分的检测方法^[34]。基于整体的方法利用整图的边缘^[35]、小波^[36]、方向梯度直方图(histogram of oriented gradient, HOG)^[37]特征, 结合支持向量机(support vector machine, SVM)、随机森林等学习算法检测行人, 而基于部分的检测方法^[38-39], 则通常识别人的特殊身体部位如头或者肩膀等来识别行人。这类方法具有较快的检测速度, 但是存在人群重叠和遮挡影响检测精度的问题, 比较适合简单场景的应用。基于特征学习与回归技术的人群密度估计技术通过特征学习, 建立合适的回归模型, 直接从图像特征映射到人群密度。这种方法可以解决人群重叠和遮挡的问题, 但是当测试场景发生变化时, 算法的性能不稳定。基于深度学习的人群密度估计技术通过大量的训练数据建立深度网络模型, 直接将图片转化为密度图。典型的方法包括MCNN^[40-41], SANet^[42], CSRNet^[43], 其计算量相对较大, 且实时

<http://www.china-simulation.com>

性相对较差。由于机场中运动的目标主要是行人，采用检测运动目标的方法可以有效提升人群密度估计的实时响应能力。

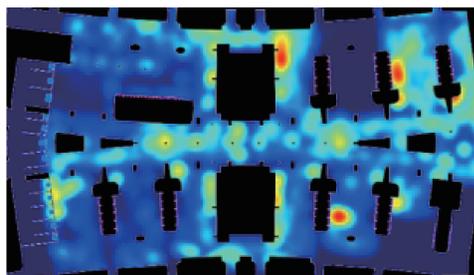
本文尝试使用高斯混合模型(Gaussian mixture model, GMM)^[44-45]对值机大厅的行人进行计数检测，取得了良好的效果。该方法认为同一个像素点在一段时间内的灰度值由多个高斯分布线性加权组成，并利用背景相减的原理得出运动目标。由于机场的监控摄像头不会随意移动，摄像头拍摄到的图像大部分是背景(即障碍物等位置相对固定物体)。背景出现的概率远高于前景(即行人等移动个体)。根据该特性，假设监控视频一直出现的是背景，并对图像中的每个像素使用若干个高斯分布函数拟合时序变化。对于每个像素点，如果其像素值与对应的高斯分布匹配，即其像素值在已存在的高斯分布中，那么可以认为该点为背景点，反之则认为前景点。最终利用检测帧的每个像素点与预先生成的背景图像做差，像素值变化大的像素点为前景图像，变化小的则认为是背景图像，从而区分出前景行人个体用于计数。最终的效果如图 4 所示，图 4(a)中每一个方框对应一个算法检测的运动行人，图 4(b)则展示了基于人数检测结果生成的人群密度热力图。

人群数量预测利用历史人群数量对场所在未来一段时间的人群密度进行预测，使得管理者能够提前预知未来场所内人群的状况，并针对未来的可能隐患进行提前的预防和调控。目前人群数量预测方法包括基于统计的预测方法^[46-49]与基于深度学习的预测方法^[50-53]。它们通过分析时空数据，对数据进行分析与学习，并最终实现对人群数量的短期预测。针对机场人群密度预测的需求，在对场景进行子区域划分的基础上，设计了一个基于深度学习技术的神经网络模型，实现了对各个子区域人群密度进行长时间预测。该模型不仅可以从监控数据中获知人群的密度信息，而且还能融合航班的时刻表信息，提供更加准确的预测。图 5 所示为模型对机场 T1 航站楼某个区域的人群

密度预测结果。



(a) 基于高斯混合模型的运动目标检测结果



(b) 航站楼人群密度热力图

图 4 基于检测运动方法实现的机场航站楼人群密度检测效果

Fig. 4 Effectiveness of detection-based method for terminal crowd density estimation

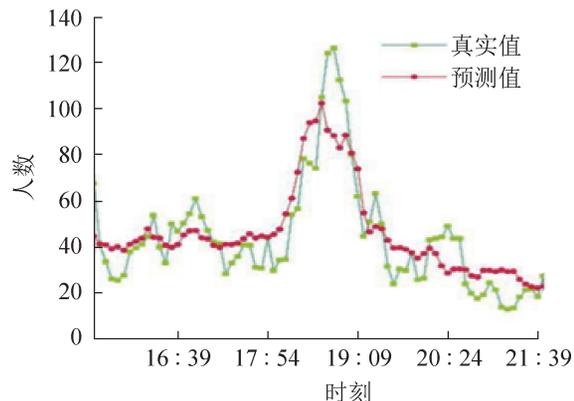


图 5 T1 航站楼人数预测曲线

Fig. 5 Crowd count prediction curve of terminal T1

3.4 服务管理优化

机场的室内面积大、结构复杂、服务设施和人流出入口多，容易导致人流拥挤。当人流量增大时(比如在节假日高峰期)，拥挤的人流容易导致意外发生。因此，有效疏导人流对提高机场安全性和提升旅客出行体验具有重要的意义。常用的人流疏导手段包括部署指示牌、设置人流护栏和

部署咨询点等, 即通过利用警示、提醒、障碍物等标志, 改变乘客的行为, 使得区域内的乘客按照指定的方式或者指定的目的地有序移动, 从而减少混乱无序的状态发生, 实现对人流的有效疏导。如图6所示, 机场管理人员通过设置护栏可以引导旅客按特定的队形有序进行值机。然而, 目前人流疏导方案仍主要由管理者手动设计, 严重依赖于管理者的主观经验, 所设置的方案的引导效果还有待提升。因此, 实现人流疏导方案智能优化是实现智慧机场的重要体现之一。目前, 已有学者提出基于演化算法和仿真模型求解复杂优化问题的方案^[15,54]。受此启发, 可将智能优化算法与人群行为仿真系统结合实现人流疏导智能优化。通过人群仿真系统对实际场景下的乘客行为进行仿真, 并基于仿真结果计算人流疏导方案的量化评估指标(比如安检口排队旅客人数和值机大厅平均旅客密度等), 实现人流疏导方案的自动化评估。在此基础上, 利用智能优化算法对人流疏导方案进行迭代智能优化, 自动搜索出在给定的量化评估指标下最优(或者近似最优)的人流疏导方案。



图6 用于引导人流的护栏摆放实例
Fig. 6 Example of guardrail placement for guiding pedestrian flow

3.5 群体聚集异常行为检测

人群聚集检测的过程就是在一个给定的监控区域内, 通过获取摄像头场景视频数据作为输入, 检测是否存在人群聚集并停留在某一范围内, 若存在, 则定位出其位置。机场内部为人群高密度聚集区域。机场环境下, 人群的行为易受

到周围环境的影响, 正常情况下就极有可能导致人群分布不均的情况。此外, 当出现特殊情况, 比如航站楼内设备(值机岛、主流程电扶梯等)改造或故障维护, 则会压缩乘客的活动区域, 使得这种不平衡状态进一步加剧, 容易带来安全隐患。因此, 监控与分析聚集人群, 防止意外事件发生, 具有重要的现实意义。当前进行人群聚集检测的主要方法包括基于传统的行人计数和基于深度学习的方法。基于行人计数的人群聚集检测技术主要是利用传统的图像特征提取技术和运动目标检测技术等得到人数统计信息后, 再根据其进行高密度人群聚集检测。此类技术比较直观地利用了视频图像数据, 检测性能良好, 但是在大规模人群聚集场景下, 因为存在人群的遮挡和重叠, 导致较难准确地检测出密集人群。利用深度学习的人群聚集检测技术主要是生成一个人群热力图, 并通过对热力图进行积分计算估计行人密度与聚集程度。此方法有较好的准确度, 但对算力要求较大, 实时响应能力较差。在机场场景下, 视频监控数据主要是俯视视角, 较少存在遮挡和重叠的情况。尝试使用基于传统的行人计数方法进行人群聚集检测, 取得了一定的辅助警示效果。利用运动目标检测得到行人信息后, 用DBSCAN方法^[55-56]分析人群密度, 当人数聚集密度大于预定阈值且持续一定时长时显示预警信息。效果如图7所示, 其中, 标为红框的两个区域, 是指在过去一段时间内, 人群密度持续超出了提前设定的阈值, 因此显示了对应的警示框。

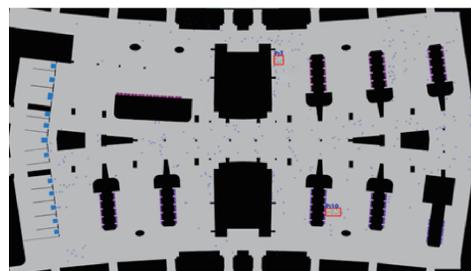


图7 密集人群检测效果
Fig. 7 Detection effect of dense crowd

4 结论

本文从建设智慧机场管控的现实需求出发,提出基于数字孪生的机场人群智慧管控方案。提出了包含数据层、建模层、功能层和应用层的机场人群智慧管控系统框架,并对各层的特性和技术进行了讨论。在此基础上,进一步结合机场具体人群管控要求,分析了其中涉及的关键技术和功能应用,并展示了一些重要模块的实践效果,验证了当前技术在实际应用中的可行性。未来,将基于该人群数字孪生框架做进一步的研究和探索,推动数字孪生技术在机场智慧管控的应用。

参考文献:

- [1] 张雷. GIS+BIM在数字孪生机场建设中的应用[J]. 工程技术研究, 2021, 6(6): 12-14.
- [2] 李欣, 刘秀, 万欣欣. 数字孪生应用及安全发展综述[J]. 系统仿真学报, 2019, 31(3): 385-392.
Li Xin, Liu Xiu, Wan Xinxin. Overview of Digital Twins Application and safe Development[J]. Journal of System Simulation, 2019, 31(3): 385-392.
- [3] 杨建伟. 3D协同可视化在智慧机场的应用与研究[J]. 中国设备工程, 2021(19): 64-66.
- [4] 孙凌. 数字孪生机场建设的思考[J]. 中国高新科技, 2021(14): 149-150.
Sun Ling. Considerations on the Construction of Digital Twin Airport[J]. China High and New Technology, 2021 (14): 149-150.
- [5] 刘潇翔, 汤亮, 曾海波, 等. 航天控制系统基于数字孪生的智慧设计仿真[J]. 系统仿真学报, 2019, 31(3): 377-384.
Liu Xiaoxiang, Tang Liang, Zeng Haibo, et al. Smart Design and Simulation of Aerospace Control System Based on Digital Twin[J]. Journal of System Simulation, 2019, 31(3): 377-384.
- [6] 吴宏刚. 智慧民航的构想和探索[J]. 网信军民融合, 2021(7): 41-43.
- [7] Grieves M. Digital Twin: Manufacturing Excellence through Virtual Factory Replication[EB/OL]. [2022-08-14]. <https://www.researchgate.net/publication/275211047>.
- [8] Grieves M, Vickers J. Digital Twin: Mitigating Unpredictable, Undesirable Emergent Behavior in Complex Systems[M]. Cham: Springer International Publishing, 2017: 85-113.
- [9] Zhong Jinghui, Li Dongrui, Huang Zhixing, et al. Data-driven Crowd Modeling Techniques: A Survey[J]. ACM Transactions on Modeling and Computer Simulation, 2022, 32(1): 4.
- [10] Wolinski D, J Guy S, Olivier A H, et al. Parameter Estimation and Comparative Evaluation of Crowd Simulations[J]. Computer Graphics Forum, 2014, 33(2): 303-312.
- [11] Zhao Mingbi, Stephen John Turner, Cai Wentong. A Data-driven Crowd Simulation Model Based on Clustering and Classification[C]//Proceedings of the 2013 IEEE/ACM 17th International Symposium on Distributed Simulation and Real Time Applications. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2013: 125-134.
- [12] Zhong Jinghui, Cai Wentong, Luo Linbo, et al. Learning Behavior Patterns from Video: A Data-driven Framework for Agent-based Crowd Modeling[C]//Proceedings of the 2015 International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems. Richland, SC: International Foundation for Autonomous Agents and Multiagent Systems, 2015: 801-809.
- [13] Alon Lerner, Yiorgos Chrysanthou, Dani Lischinski. Crowds by Example[J]. Computer Graphics Forum, 2007, 26(3): 655-664.
- [14] Chen Yimeng, Cheng-Lung Wu, Pong Lung Lau, et al. Airport Passenger Shopping Modeling and Simulation: Targeting Distance Impacts[C]//2019 Winter Simulation Conference (WSC). Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2019: 524-535.
- [15] Zhong Jinghui, Cheng Tiantian, Liu Weili, et al. An Evolutionary Guardrail Layout Design Framework for Crowd Control in Subway Stations[J]. IEEE Transactions on Computational Social Systems, 2023, 10(1): 297-310.
- [16] Andrew J Park, Housseem Zouaghi, Herbert H Tsang. Crowd Control Strategy Framework Using Real-time 3D Simulations[C]//2018 IEEE 9th Annual Information Technology, Electronics and Mobile Communication Conference (IEMCON). Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2018: 253-258.
- [17] Jur van den Berg, Guy S J, Lin Ming, et al. Reciprocal n-Body Collision Avoidance[C]//Robotics Research. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2011: 3-19.
- [18] Claudio Feliciani, Kenichiro Shimura, Daichi Yanagisawa, et al. Study on the Efficacy of Crowd Control and Information Provision Through a Simple Cellular Automata Model[C]//Cellular Automata. Cham: Springer International Publishing, 2018: 470-480.
- [19] 邵荃, 唐志星, 孙海燕, 等. 基于视频图像分析的旅客群体性事件预警方法[J]. 解放军理工大学学报(自然科学

- 版), 2013, 14(5): 501-506.
- Shao Quan, Tang Zhixing, Sun Haiyan, et al. Mass Events Warning in Terminal Based on Video Surveillance [J]. *Journal of PLA University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2013, 14(5): 501-506.
- [20] Zheng Yujun, Sheng Weiguo, Sun Xingming, et al. Airline Passenger Profiling Based on Fuzzy Deep Machine Learning[J]. *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, 2017, 28(12): 2911-2923.
- [21] 张龙财, 余美君. 航站楼到港旅客应急疏散仿真优化[J]. *综合运输*, 2021, 43(10): 83-89.
- Zhang Longcai, Yu Meijun. Simulation and Majorization of the Terminal Arrival Emergency Evacuation[J]. *China Transportation Review*, 2021, 43(10): 83-89.
- [22] 陶飞, 刘蔚然, 刘检华, 等. 数字孪生及其应用探索[J]. *计算机集成制造系统*, 2018, 24(1): 1-18.
- Tao Fei, Liu Weiran, Liu Jianhua, et al. Digital Twin and Its Potential Application Exploration[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2018, 24(1): 1-18.
- [23] 刘大同, 郭凯, 王本宽, 等. 数字孪生技术综述与展望[J]. *仪器仪表学报*, 2018, 39(11): 1-10.
- Liu Datong, Guo Kai, Wang Benkuan, et al. Summary and Perspective Survey on Digital Twin Technology[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2018, 39(11): 1-10.
- [24] Qi Qinglin, Tao Fei, Hu Tianliang, et al. Enabling Technologies and Tools for Digital Twin[J]. *Journal of Manufacturing Systems*, 2021, 58, Part B: 3-21.
- [25] 杨林瑶, 陈思远, 王晓, 等. 数字孪生与平行系统: 发展现状、对比及展望[J]. *自动化学报*, 2019, 45(11): 2001-2031.
- Yang Linyao, Chen Siyuan, Wang Xiao, et al. Digital Twins and Parallel Systems: State of the Art, Comparisons and Prospect[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2019, 45(11): 2001-2031.
- [26] Greyce N Schroeder, Charles Steinmetz, Carlos E Pereira, et al. Digital Twin Data Modeling with AutomationML and a Communication Methodology for Data Exchange[J]. *IFAC-PapersOnLine*, 2016, 49(30): 12-17.
- [27] Lien S Y, Cheng S M, Shih S Y, et al. Radio Resource Management for QoS Guarantees in Cyber-physical Systems[J]. *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, 2012, 23(9): 1752-1761.
- [28] Amarjeet Singh Yumnam, Y Chaitanya Sreeram, Shaik Abdul Naeem. Overview: Weblog Mining, Privacy Issues and Application of Web Log Mining[C]//2014 International Conference on Computing for Sustainable Global Development (INDIACom). Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2014: 638-641.
- [29] Florian Biesinger, Davis Meike, Benedikt Kraß, et al. A Case Study for a Digital Twin of Body-in-white Production Systems General Concept for Automated Updating of Planning Projects in the Digital Factory[C]//2018 IEEE 23rd International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA). Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2018: 19-26.
- [30] 王巍, 刘永生, 廖军, 等. 数字孪生关键技术及体系架构[J]. *邮电设计技术*, 2021(8): 10-14.
- Wang Wei, Liu Yongsheng, Liao Jun, et al. Key Technology and Architecture of Digital Twin[J]. *Designing Techniques of Posts and Telecommunications*, 2021(8): 10-14.
- [31] Li Yixian, Zhong Jinghui. HAS-EA: A Fast Parallel Surrogate-assisted Evolutionary Algorithm[J]. *Memetic Computing*, 2023, 15(1): 103-115.
- [32] Li Xiaoyong, Yuan Jie, Ma Huadong, et al. Fast and Parallel Trust Computing Scheme Based on Big Data Analysis for Collaboration Cloud Service[J]. *IEEE Transactions on Information Forensics and Security*, 2018, 13(8): 1917-1931.
- [33] 赵慕铭. 面向视频监控场景的人群计数算法研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2020.
- Zhao Muming. Crowd Counting in Surveillance Videos [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2020.
- [34] Li Bo, Huang Hongbo, Zhang Ang, et al. Approaches on Crowd Counting and Density Estimation: A Review[J]. *Pattern Analysis and Applications*, 2021, 24(3): 853-874.
- [35] Wu Wu, Nevatia R. Detection of Multiple, Partially Occluded Humans in a Single Image by Bayesian Combination of Edgelet Part Detectors[C]//Tenth IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV'05). Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2005: 90-97.
- [36] Viola P, Jones M J. Robust Real-time Face Detection[J]. *International Journal of Computer Vision*, 2004, 57(2): 137-154.
- [37] Dalal N, Triggs B. Histograms of Oriented Gradients for Human Detection[C]//2005 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR'05). Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2005: 886-893.
- [38] Su Feng, Fang Gu, Zou Jujia. Human Detection Using a Combination of Face, Head and Shoulder Detectors[C]//2016 IEEE Region 10 Conference (TENCON). Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2016: 842-845.
- [39] Ji Tao, Liu Leibo, Zhu Wenping, et al. Fast and Efficient Integration of Human Upper-body Detection and Orientation Estimation in RGB-D Video[C]//2017 IEEE 9th International Conference on Communication Software and Networks (ICCSN). Piscataway, NJ, USA:

- IEEE, 2017: 1178-1181.
- [40] Zhang Yingying, Zhou Desen, Chen Siqin, et al. Single-image Crowd Counting via Multi-column Convolutional Neural Network[C]//2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2016: 589-597.
- [41] Yuan Lu, Zhang Hao, Xu Ming, et al. A Multiscale CNN Framework for Wireless Technique Classification in Internet of Things[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2022, 9(12): 10366-10367.
- [42] Cao Xinkun, Wang Zhipeng, Zhao Yanyun, et al. Scale Aggregation Network for Accurate and Efficient Crowd Counting[C]//Computer Vision-ECCV 2018. Cham: Springer International Publishing, 2018: 757-773.
- [43] Abhishek Subramaniam, Vatsal G Shah, Preet D Tibrewala, et al. Crowd Count Estimator Application using CSRNet[C]//2021 International Conference on Intelligent Technologies (CONIT). Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2021: 1-6.
- [44] 张震宇, 董丹慧, 冯曙明, 等. 基于高斯混合模型的电力仓库视频运动目标检测[J]. 计算机与数字工程, 2021, 49(8): 1580-1583.
Zhang Zhenyu, Dong Danhui, Feng Shuming, et al. Video Moving Target Detection in Power Warehouse Based on Gaussian Mixture Model[J]. Computer and Digital Engineering, 2021, 49(8): 1580-1583.
- [45] Yan Menggen, Li Lianghai, Chen Haochuan. A VideoSAR Moving Target Detection Method Based on GMM[C]//2021 IEEE 2nd International Conference on Pattern Recognition and Machine Learning (PRML). Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2021: 64-69.
- [46] 卢振坤, 刘胜, 钟乐, 等. 人群计数研究综述[J]. 计算机工程与应用, 2022, 58(11): 33-46.
Lu Zhenkun, Liu Sheng, Zhong Le, et al. Survey on Research of Crowd Counting[J]. Computer Engineering and Applications, 2022, 58(11): 33-46.
- [47] Shekhar S, Williams B M. Adaptive Seasonal Time Series Models for Forecasting Short-term Traffic Flow [J]. Transportation Research Record, 2007, 2024(1): 116-125.
- [48] Marco Lippi, Matteo Bertini, Paolo Frasconi. Short-term Traffic Flow Forecasting: An Experimental Comparison of Time-series Analysis and Supervised Learning[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2013, 14(2): 871-882.
- [49] Zheng Jiangchuan, Ni L M. Time-dependent Trajectory Regression on Road Networks Via Multi-task Learning [C]//Proceedings of the Twenty-Seventh AAAI Conference on Artificial Intelligence. Palo Alto, CA, USA: AAAI Press, 2013: 1048-1055.
- [50] Zhang Junbo, Zheng Yu, Qi Dekang, et al. DNN-based Prediction Model for Spatio-temporal Data[C]//Proceedings of the 24th ACM SIGSPATIAL International Conference on Advances in Geographic Information Systems. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, 2016: 92.
- [51] Wang Senzhang, Cao Jiannong, Chen Hao, et al. SeqSTGAN: Seq2Seq Generative Adversarial Nets for Multi-step Urban Crowd Flow Prediction[J]. ACM Transactions on Spatial Algorithms and Systems, 2020, 6(4): 22.
- [52] Shi Xingjian, Chen Zhourong, Wang Hao, et al. Convolutional LSTM Network: A Machine Learning Approach for Precipitation Nowcasting[C]//Proceedings of the 28th International Conference on Neural Information Processing Systems. Cambridge, MA, USA: MIT Press, 2015: 802-810.
- [53] Wang Senzhang, Miao Hao, Chen Hao, et al. Multi-task Adversarial Spatial-temporal Networks for Crowd Flow Prediction[C]//Proceedings of the 29th ACM International Conference on Information & Knowledge Management. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, 2020: 1555-1564.
- [54] Zhong Jinghui, Li Dongrui, Cai Wentong, et al. Automatic Crowd Navigation Path Planning in Public Scenes Through Multiobjective Differential Evolution[J/OL]. IEEE Transactions on Computational Social Systems. (2022-11-7) [2022-12-04]. <https://doi.org/10.1109/TCSS.2022.3217417>.
- [55] Martin Ester, Hans-Peter Kriegel, Jörg Sander, et al. A Density-based Algorithm for Discovering Clusters in Large Spatial Databases with Noise[C]//Proceedings of the Second International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining. Palo Alto, CA, USA: AAAI Press, 1996: 226-231.
- [56] Chen Yewang, Zhou Lida, Pei Songwen, et al. KNN-BLOCK DBSCAN: Fast Clustering for Large-scale Data [J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 2021, 51(6): 3939-3953.