

8-25-2023

Monitoring Method Research on Passenger Behavior on Escalator Based on Digital Twin

Nan Lü

*College of Metrology&Measurement Engineering, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China,
1622307952@qq.com*

Qibing Wang

College of Metrology&Measurement Engineering, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China

Lu Jiawei

College of Metrology&Measurement Engineering, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China

Juntong Chen

Special Equipment Institute, Hangzhou Vocational&Technical College, Hangzhou 310018, China

See next page for additional authors

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.

Monitoring Method Research on Passenger Behavior on Escalator Based on Digital Twin

Abstract

Abstract: In order to solve the problems that the traditional escalator cannot be monitored and analyzed in real time during operation, the management and maintenance only on escalator equipment side, and the lack of monitoring passenger dangerous behavior, a monitoring method of passenger behavior on escalator based on digital twin is proposed. *By constructing the digital twin of escalators, a visual interface is designed to map the escalator running status and passenger behavior data. Through passenger video surveillance, the improved OpenPose posture recognition algorithm is used to obtain the key point data of human body. Posture recognition is classified to complete the real-time mapping of virtual characters, the rapid warning of potential dangers and the emergency stop control of fall behavior. The Experiments show that the method has the characteristics of high real-time performance, accurate recognition and strong interaction. The advantages of digital twin are used to simulate the passenger behavior in digital space to enhance data.* This method can effectively help to deal with the accidents in time, protect the life and property of passenger.

Keywords

digital twin, escalator, real-time mapping, posture recognition, stop control

Authors

Nan Lü, Qibing Wang, Lu Jiawei, Juntong Chen, and Gang Xiao

Recommended Citation

Lü Nan, Wang Qibing, Lu Jiawei, et al. Monitoring Method Research on Passenger Behavior on Escalator Based on Digital Twin[J]. Journal of System Simulation, 2023, 35(8): 1737-1747.

基于数字孪生的自动扶梯乘客行为监测方法研究

吕楠¹, 王琪冰¹, 陆佳炜¹, 陈军统², 肖刚^{1*}

(1. 中国计量大学 计量测试工程学院, 浙江 杭州 310018; 2. 杭州职业技术学院 特种设备学院, 浙江 杭州 310018)

摘要: 为解决传统自动扶梯在运行过程中无法实时监控分析、管理维护只停留在扶梯设备一方、缺乏对乘客危险行为监测等问题, 提出基于数字孪生的自动扶梯乘客行为监测方法。构建自动扶梯的数字孪生体, 设计可视化界面映射扶梯运行状态及乘客行为数据。通过乘客视频监控, 使用改进的 OpenPose 姿态识别算法来获取人体关键点数据。对姿态识别进行分类, 完成对虚拟人物的实时映射, 实现对潜在危险的快速预警和跌倒行为的急停控制。实验表明: 该方法具有实时性高、识别准确和交互性强的特点, 可利用数字孪生的优势, 在数字空间中模拟乘客行为来增强数据, 有效帮助管理人员及时处理险情, 保护乘客生命财产安全。

关键词: 数字孪生; 自动扶梯; 实时映射; 姿态识别; 急停控制

中图分类号: TP391.9 文献标志码: A 文章编号: 1004-731X(2023)08-1737-11

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.22-0434

引用格式: 吕楠, 王琪冰, 陆佳炜, 等. 基于数字孪生的自动扶梯乘客行为监测方法研究[J]. 系统仿真学报, 2023, 35(8): 1737-1747.

Reference format: Lü Nan, Wang Qibing, Lu Jiawei, et al. Monitoring Method Research on Passenger Behavior on Escalator Based on Digital Twin[J]. Journal of System Simulation, 2023, 35(8): 1737-1747.

Monitoring Method Research on Passenger Behavior on Escalator Based on Digital Twin

Lü Nan¹, Wang Qibing¹, Lu Jiawei¹, Chen Juntong², Xiao Gang^{1*}

(1. College of Metrology&Measurement Engineering, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China;
2. Special Equipment Institute, Hangzhou Vocational&Technical College, Hangzhou 310018, China)

Abstract: In order to solve the problems that the traditional escalator cannot be monitored and analyzed in real time during operation, the management and maintenance only on escalator equipment side, and the lack of monitoring passenger dangerous behavior, a monitoring method of passenger behavior on escalator based on digital twin is proposed. By constructing the digital twin of escalators, a visual interface is designed to map the escalator running status and passenger behavior data. Through passenger video surveillance, the improved OpenPose posture recognition algorithm is used to obtain the key point data of human body. Posture recognition is classified to complete the real-time mapping of virtual characters, the rapid warning of potential dangers and the emergency stop control of fall behavior. The Experiments show that the method has the characteristics of high real-time performance, accurate recognition and strong interaction. The advantages of digital twin are used to simulate the passenger behavior in digital space to enhance data. This method can effectively help to deal with the accidents in time, protect the life and property of passenger.

Keywords: digital twin; escalator; real-time mapping; posture recognition; stop control

收稿日期: 2022-04-29 修回日期: 2022-07-14

基金项目: 国家自然科学基金(61976193)

第一作者: 吕楠(1996-), 男, 硕士生, 研究方向为数字孪生和人工智能。E-mail: 1622307952@qq.com

通讯作者: 肖刚(1965-), 男, 教授, 博导, 博士, 研究方向为数字孪生、智能制造和人工智能。E-mail: xg@zjut.edu.cn

0 引言

随着工业 4.0 和《中国制造 2025》的相继提出,数字孪生^[1-2]得到了广泛应用。数字孪生技术^[3]是将物理世界的信息在信息世界的数字模型中进行描述表达,数字模型按照物理世界运转规律来运行,数字模型能够实现自我感知、监测、预测及决策处理存在的问题和未知的风险^[4-5]。现今,在现代传感技术、通信技术以及人工智能等技术不断发展的基础上,数字孪生具备了实现的条件。新一代的智能系统应该是以人-机器-信息-服务融合实现人-机动态交互、双向协调,是未来智能制造^[6-7]领域发展的必然趋势。在人-机器-信息-服务的模型中,人既是数字孪生的主体对象,也是服务层执行决策的主体。利用计算机视觉^[8]和增强现实技术^[9]实现对物理实体的监控,实现物理实体到虚拟对象的映射,在数字空间中实现虚拟仿真、虚拟验证以及虚拟预测,将预测的结果返回给人-机器,对服务的决策执行辅助指导,实现了数字孪生的闭环。

在现实的生产生活中,由于机器故障或操作不当,导致安全事故频发,人与机器之间的和谐共生和安全交互难以实现。为了实现人与机器设备稳定、安全协同运作的目标,许多专家和学者进行了相关研究。Greco 等^[10]通过实时监控人体在工作活动时的动作状态,提出了一种旨在监督和决策的人工生产线数字孪生方法来保障安全生产。Bilberg 等^[11]基于数字孪生实现人与机器由物理空间到虚拟空间的实时映射和动态交互,实现面向装配系统的工业应用。宋学官等^[12]提出了一种基于机理模型、人工智能算法、数据填充技术和反向运动学技术的人体骨骼数字孪生构建方法及应用。Onan 等^[13]提出了一种基于仿真的计算设计方法,利用人体工程学设计原则,在建模平台上实现了数字人体闭环系统的构建。Havard 等^[14]提出将数字孪生的精确模拟能力与 VR 技术相结合的交互式设计理念,建立协同仿真与通信的体

系结构。

本文基于数字孪生技术,以实际自动扶梯运载乘客为例构建数字孪生环境,通过视频监控对扶梯上乘客行为进行监督,识别人体姿态行为并映射到数字孪生虚拟环境中。对乘客存在的危险行为,可以实现预警或控制扶梯停止运行。通过设计的人-机器-信息-服务的三维可视化数字孪生监测系统,实现了扶梯设备、乘客及管理者的信息闭环。

1 自动扶梯的安全现状

截至 2021 年,我国电梯设备的数量已经有 844.7 万台,其中自动扶梯和自动人行道接近 90 万台,自动扶梯作为公共场所重要的交通工具,遍布商城、车站、天桥等公共场所。自动扶梯安全事故屡有发生,造成了严重的社会影响和人身伤害。目前,自动扶梯安全检测手段主要有 2 种:①通过在扶梯的出入口分配专门的安保人员来维护扶梯运行的现场秩序,人工维护的方式会耗费巨大的人力资源,即使危险发生也不能立刻使设备停止运行;②通过红外线、超声波等装置对人体进行检测,播放“站稳扶好注意安全”的提示语音,这种方式也无法对危险预警和响应。针对自动扶梯的复杂使用环境,2011 年起实施的国家标准 GB16899-2011《自动扶梯和自动人行道的制造与安装安全规范》^[15]规定,自动扶梯在设计时应考虑人类工效学原则。显然目前的自动扶梯运行维护已经不能满足实际需求。

因此,只从设备的角度通过安装传感器和安全装置来避免扶梯设备出现故障具有一定的局限性。本文从乘客的行为出发,构建自动扶梯运载乘客的数字孪生环境,利用深度学习和计算机视觉技术对视频中乘客的行为进行分析,划分乘客行为的安全和危险姿态。对于存在潜在危险行为的乘客通过监测系统实现警告,对有跌倒乘客的情况立即控制扶梯设备停止运行。

2 乘客行为监测的数字孪生框架及关键技术

2.1 数字孪生框架实现

为了实现对自动扶梯运载乘客整个过程的实时监测, 需要获得人体姿态信息来分析乘客行为的安全性。从监控视频获取乘客行为数据, 利用本文改进的人体姿态识别算法 I-OpenPose 识别乘

客姿态, 由识别的结果触发虚拟人物完成在虚拟层的行为映射。除了直观地观察和分析扶梯上乘客的行为, 最重要的是可以实现数字孪生监测系统对乘客危险行为的实时处理。运维人员发现报警信息, 可以第一时间处理安全事故。参考陶飞等^[16]提出的数字孪生五维模型, 本文数字孪生扶梯乘客行为监测系统分为 4 层, 分别为物理层、信息层、虚拟层和管理执行层, 如图 1 所示。

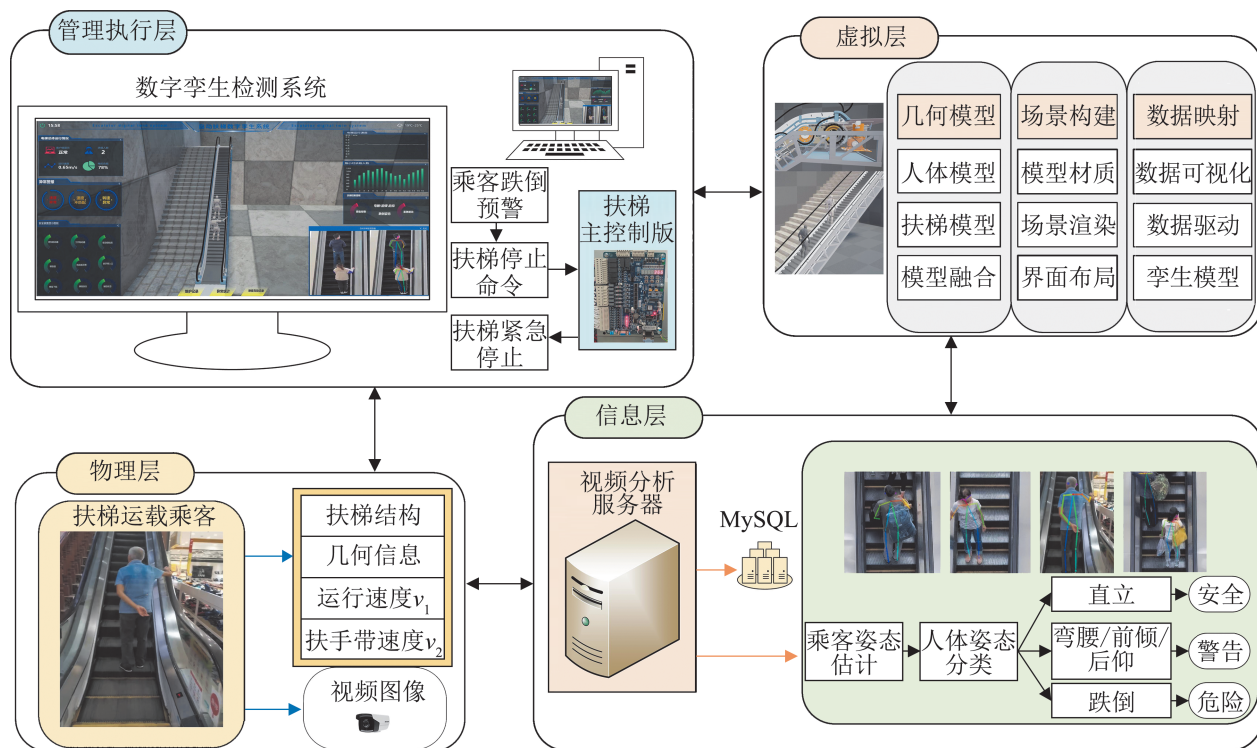


图 1 数字孪生扶梯乘客行为监测系统的四维模型
Fig. 1 Four-dimensional model of digital twin escalator passenger behavior monitoring system

扶梯模型使用 SolidWorks 和 3DS Max 制作, 利用 UE(unreal engine)实现自动扶梯和乘客虚拟场景的构建。虚拟场景主要分为 3 部分: ①几何模型。按照扶梯设备结构分为 8 部分, 分别是桁架、梯级系统、扶手带系统、导轨系统、扶手装置、安全保护装置、电气控制系统和润滑系统, 乘客模型使用 UE 中的虚拟人物。②场景构建。主要是对几何模型的进一步加工, 在 UE 里添加物理属性、材质、灯光和碰撞体, 使几何模型更加接近现实世界的物理实体。③数据映射。使用 C++ 和

BluePrint 对扶梯各部分进行定义和驱动, 通过乘客行为识别的结果来实时映射虚拟人物运动, 虚拟场景构建如图 2 所示。

孪生数据是物理层和虚拟层之间的桥梁, 本文需要传输的孪生数据为乘客行为信息。将采集到的乘客行为数据, 在视频分析服务器检测出人体姿态信息后, 将乘客行为视频和人体姿态的关键点数据传输到客户端。客户端为数字孪生监测系统, 通过 Socket^[17]建立双向通信。由于 Socket 通信采用 TCP 协议, 而 TCP 协议可以保证孪生数

据的可靠稳定实时传输。乘客行为数据用于人物模型的实时驱动，同时把数据储存在 MySQL 数据库中。自动扶梯的控制通过 RS485 总线，将运行数据上传到上位机控制器，Socket 服务端接收到监测系统客户端的预警和停止命令，通过上位机发送指令控制扶梯停止运行。

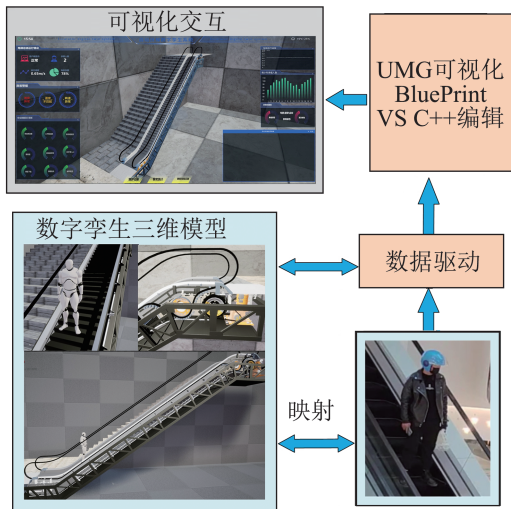


图2 扶梯虚拟场景的构建
Fig. 2 Construction of escalator virtual scene

虚拟层展示了扶梯运行的关键参数和乘客行为信息，在虚拟层中利用 UE 的 UMG(unreal motion graphics ui designer)功能设计可视化界面，

可视化图表文字分布在虚拟场景两侧，增强人机交互的体验。数据的实时传输通过 TCP Socket Connection 来解析，方便客户端运维人员的管理，使管理人员可以实时了解乘客的行为状态。

2.2 人体姿态识别关键技术

人体姿态研究通过图像检测出人体的关键点信息，如眼睛、鼻子、肩膀、手臂关节和腿部关节等。目前，人体姿态识别有自上而下和自下而上 2 种方案。自上而下(top-down): 先从图像中检测出多个人体，再进行关键点定位，十分依赖人体检测结果的准确性，存在重复检测和遗漏问题，检测速度与人数有关，复杂场景下的识别速度很缓慢。自下而上(bottom-up): 先预测人体关键点的热点图，再通过聚类处理产生不同个体，检测速度与人体数量无关，检测速度明显优于自上而下，但会存在关键点错误连接。Cao 等^[18]提出了基于自下而上的开源人体姿态识别算法 OpenPose，采用 VGG-19 预训练网络，提取图像特征 F ， F 作为输入，进入 2 个分支 PAFs(part affinity fields)和 PCM(part confidence maps)，利用 PAFs 来表达像素点在姿态上的走向，OpenPose 模型框架示意图如图 3 所示。

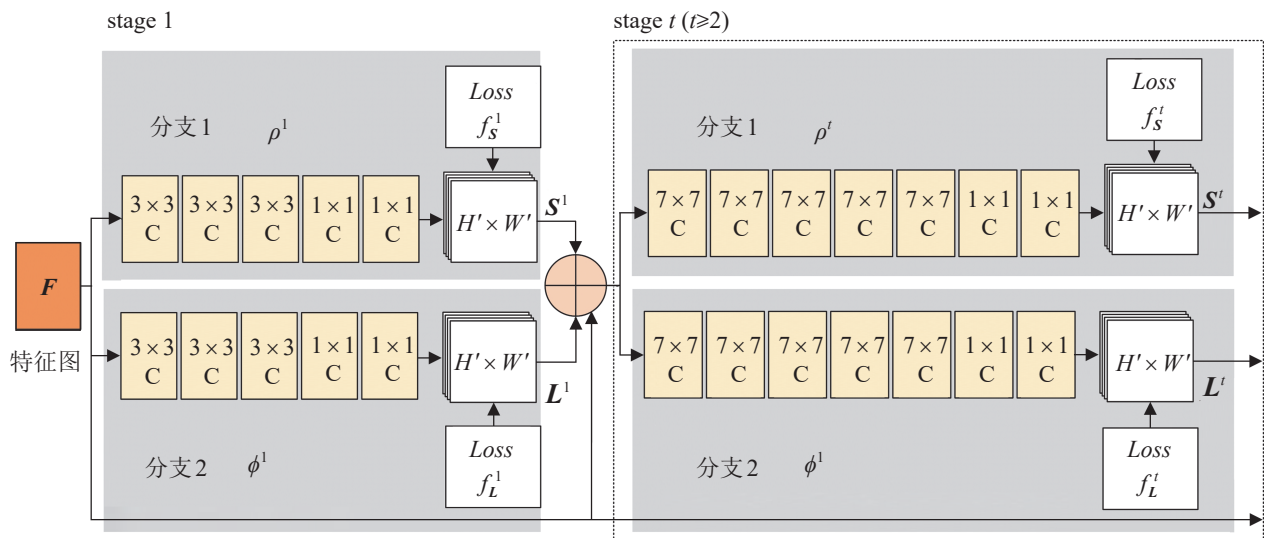


图3 OpenPose 框架
Fig. 3 OpenPose frame

各个分支的迭代为

$$S^t = \rho^t(F, L^{t-1}, S^{t-1}), t \geq 2 \quad (1)$$

$$L^t = \phi^t(F, L^{t-1}, S^{t-1}), t \geq 2 \quad (2)$$

式中: ρ^t, ϕ^t 为 t 阶段迭代关系; F 为特征图; S 为二维置信图; L 为部分亲和场(对应分支2)。

为了使网络迭代能够预测2个分支 PAFs 和 PCM, 每个阶段输出一个损失 $Loss$, 损失函数为

$$f_s^t = \sum_{j=1}^J \sum_p W(p) \|S_j^t(p) - S_j^*(p)\|_2^2 \quad (3)$$

$$f_l^t = \sum_{c=1}^C \sum_p W(p) \|L_c^t(p) - L_c^*(p)\|_2^2 \quad (4)$$

式中: $S_j^*(p)$ 为真实的关键点部位置信图; $L_c^*(p)$ 为真实的关键点部分亲和场; W 为一个二进制编解码, 在图像位置 p 处无标注 $W(p)$ 为0, 否则为1。

由二维关键点的图像生成计算 S 的置信图, 用 $S_{j,k}^*(p)$ 表示 k 个人生成的所有置信图, 用 $X_{j,k}$ 表示图像中第 k 个人的第 j 个关键点, 在 p 处的预测值为

$$S_{j,k}^*(p) = \exp\left(-\frac{\|p - X_{j,k}\|_2^2}{\delta^2}\right) \quad (5)$$

以 $S_{j,k}^*(p)$ 的最大值来表示多人关键点部位最终获得的置信图。OpenPose 中使用 PAFs 记录每个关键点的二维向量场, 如图4所示。

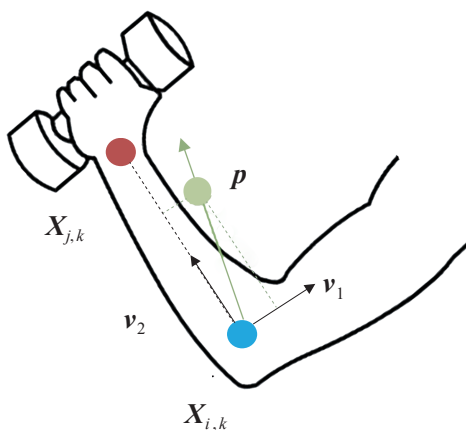


图4 姿态关键点二维向量场图

Fig. 4 2D vector field of attitude key points

$X_{i,k}$ 和 $X_{j,k}$ 表示肘部和手腕关键点, 肢体上有

一点 p , 则 $L_{c,k}^*(p)$ 的值是一个从 i 到 j 的单位向量, p 点的向量场为

$$L_{c,k}^*(p) = \begin{cases} \frac{(X_{j,k} - X_{i,k})}{\|X_{j,k} - X_{i,k}\|_2}, p \in L_{c,k}^*(p) \\ 0, \text{ others} \end{cases} \quad (6)$$

最终获得的所有人的平均 PAF 的值为

$$L_c^*(p) = \frac{1}{n_c(p)} L_{c,k}^*(p) \quad (7)$$

式中: $n_c(p)$ 为非0向量的个数。

在多人场景下, 利用式(8)计算肢体的评分, 寻找关联置信度最大的情况。

$$E = \int_{N=0}^{N=1} L_c(p(u)) \frac{d_{j_2} - d_{j_1}}{\|d_{j_2} - d_{j_1}\|_2} du \quad (8)$$

将多人检测问题变成二分图匹配问题, 得到相连点的最优解, 最后获取所有可能的肢体预测结果, 将人体的所有关键点连接起来。

3 面向人体姿态识别的数字模型

自动扶梯上的乘客姿态识别是一项复杂的工作, 本文设计了一种改进的 I-OpenPose 算法来提高识别的准确性。对识别到的人体姿态结果利用 SVM^[19] 进行分类, 划分直立、弯腰/前倾/后仰及跌倒五种类别, 对应3个安全等级为安全、警告和危险, 对于弯腰/前倾/后仰姿态监测系统发出预警, 对于跌倒行为会触发监测系统控制自动扶梯停止运行。根据分类的5种姿态结果, 对应虚拟层中乘客模型的5种姿态动作, 在安全直立的情况下, 虚拟人物会一直从扶梯入口进入到出口结束, 呈现周期性运动。若识别结果为其他4种姿态, 会触发虚拟人物对应的4种动作, 同时监测界面会预警。面向人体姿态识别的监测系统框图如图5所示。

3.1 特征金字塔融合 OpenPose 的姿态识别

OpenPose 具有识别速度快、准确性高的优势, 但自动扶梯视频监控的范围比较广, 存在关键点局部信息特征不明显、背景中容易出现混淆

问题，所以需要考虑更大的感受野。其次，人体不同部位的关键点检测难度不同，通常是下身关键点检测难度高于上身检测。OpenPose 中使用 VGG-19 的提取网络是一个逐渐递进的结构，随着对原始图像不断卷积，特征图的显著性逐渐降低。因此，为了提升在扶梯运行环境中人体姿态识别的效果，本文提出 I-OpenPose 框架引入 FPN 金字塔特征网络^[20]融合来提升识别的准确性，图 6 为本文 I-OpenPose 框架融合示意图。

根据图 6 可知，FPN 选择从 Conv3_4 起将所有层作为 FPN 的网络，其中，Conv6 是添加的全连接层 FC-4096。Conv3_4、Conv4_4、Conv5_4、Conv6 为 VGG 层，通过 1×1 的卷积得到 M3、M4、M5、M6 为连接层，经过 UpSample 上采样层使得与下一级通道数相同，执行相加操作得到相加层 L3、L4、L5，再经过 3×3 的卷积操作，输出 7×7、14×14、28×28、56×56，最后得到预测层 P3、P4、P5、P6。

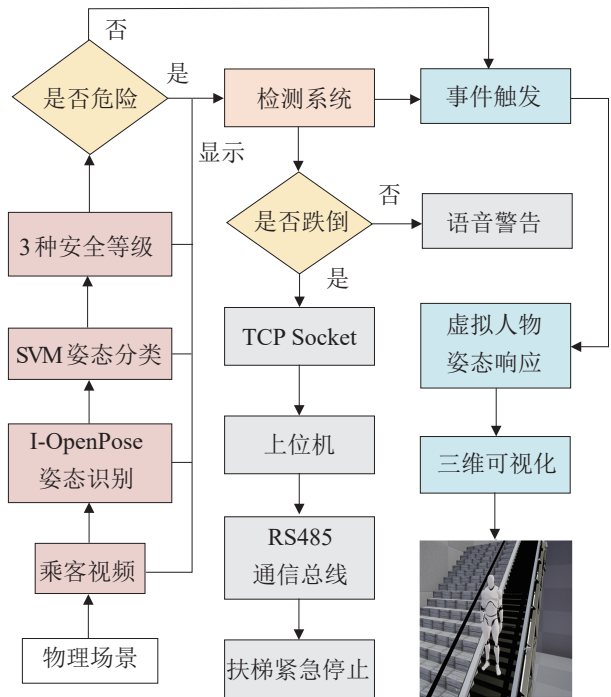


图 5 人体姿态识别监测系统流程图
Fig. 5 Flow chart of human posture recognition and monitoring system

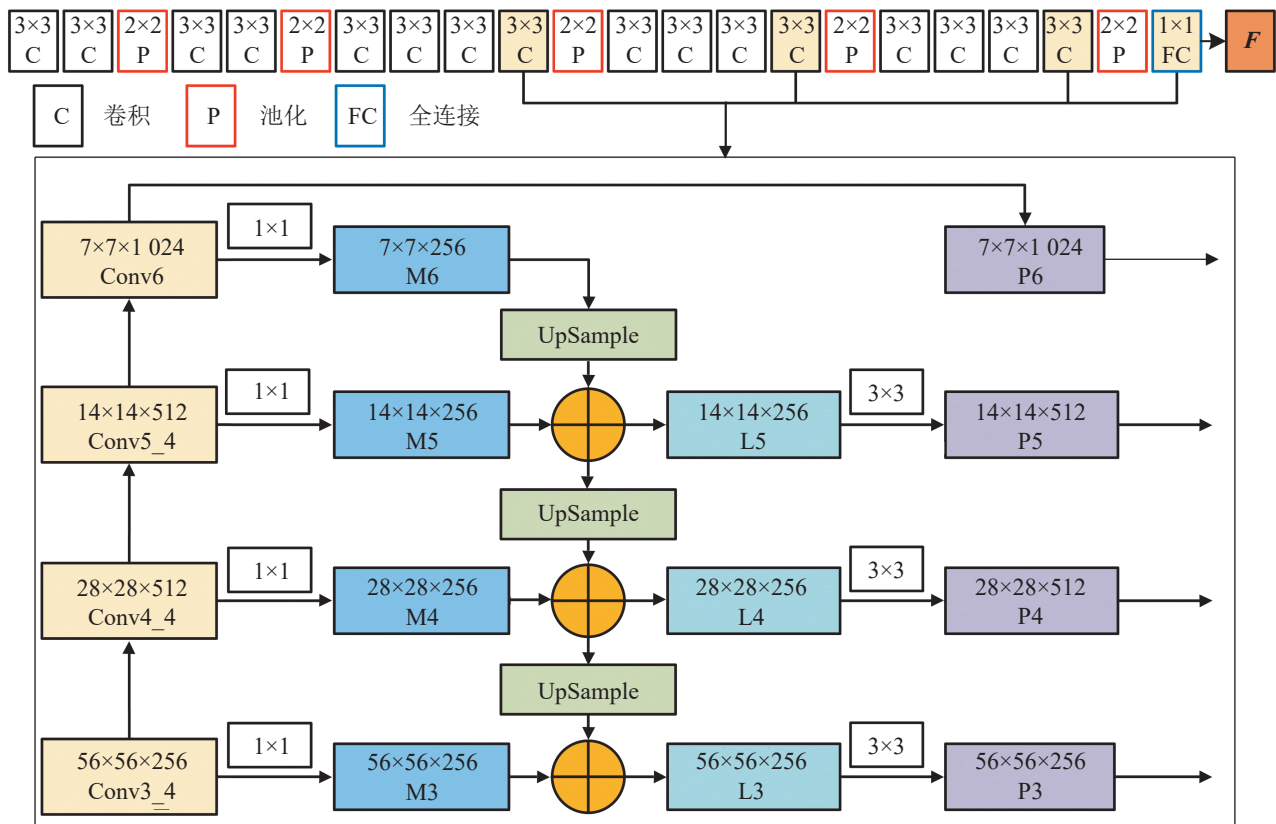


图 6 I-OpenPose 框架融合示意图
Fig. 6 I-OpenPose framework fusion diagram

I-OpenPose 训练使用 COCO2017 数据集, 选取数据中提供的 person_keypoints 数据部分的 64 115 张图像, 训练和测试的数据以 JSON 文件形式呈现。每张图片标注了 17 个关键点: 1 鼻子、2 左肩、3 左肘、4 左手腕、5 右肩、6 右肘、7 右手腕、8 左胯骨、9 左膝、10 左脚踝、11 右胯骨、12 右膝、13 右脚踝、14 左眼、15 右眼、16 左耳、17 右耳, 如图 7 所示。在人体姿态识别中通常把左肩和右肩的中间作为 0 脖子的关键点, 共 18 个关键点。

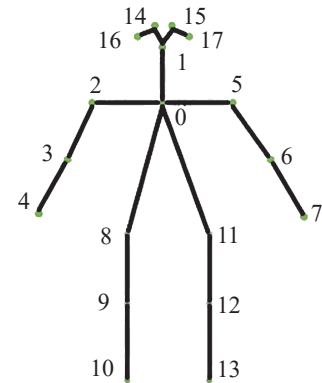


图7 COCO数据集人体关键点标注
Fig. 7 COCO dataset human key point annotation

3.2 基于数字孪生的人体姿态数据增强

人体姿态识别结果为直立、弯腰、前倾、后仰和跌倒 5 种姿态。由于现实中缺少跌倒、后仰等数据, 为了不影响 3.3 节的 SVM 分类训练过程, 在数字孪生的虚拟场景中, 构建虚拟人物模拟现实中的人体姿态来实现数据增强, 如图 8 所示。

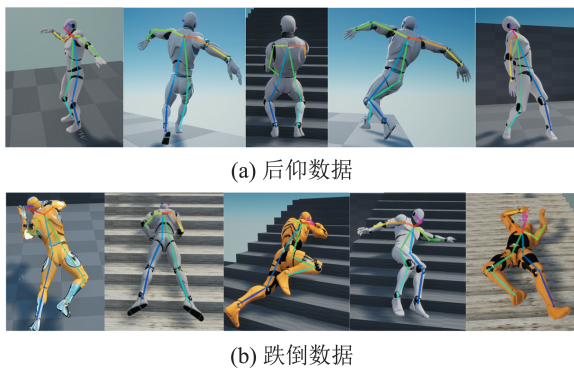


图8 数字孪生虚拟环境中数据增强
Fig. 8 Data enhancement in digital twin virtual environment

为了在数字孪生虚拟空间中模拟的人物行为符合人体运动学, 必须以实际的数据为参考。在现实中人体运动是肌肉、骨骼等共同作用下的结果, 在虚拟空间中, 为了人体运动符合物理世界规律, 将人体简化为骨骼模型, 由各个关节的有限旋转位移构成完整的运动姿态。具体的实现是在 Unreal Engine 引擎下构建虚拟人物动作, 流程如图 9 所示。

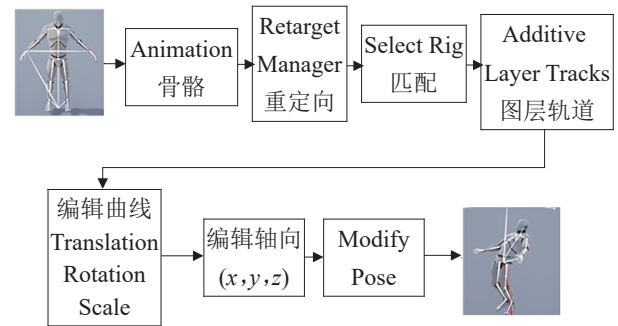


图9 数字孪生虚拟人物行为构建流程
Fig. 9 Virtual character behavior construction process in digital twin

3.3 乘客姿态识别结果分类

I-OpenPose 的输出是一个拥有置信度的二维关键点数组, 而数字孪生监测系统需要的是具体姿态类别结果, 姿态识别结果分类主要有 2 种: ①根据关键点计算人体肢体的倾角进而判断人的行为, 但准确率较低; ②SVM 分类器, 相比关键点倾角计算, 这种分类方法对数据集的要求更低, SVM 分类可以自动处理部分关键点因为遮挡而产生缺失的情况, 分类的准确率比关键点倾角计算高。

SVM 是机器学习中有监督的学习模型, 本身用于解决二分类问题。由于需要对人的多个姿态进行分类, 将利用 1-V-1(one-versus-one) 实现对人体姿态的分类, 每 2 类设计 1 个 SVM 分类器, 共需要 $k(k-1)/2$ 个分类器。本文采用 Python 中 libsvm 库提供的 1-V-1 SVM 方法, 训练 10 个分类器得到最后的分类结果, 不同分类结果对应的虚拟人物行为如图 10 所示。

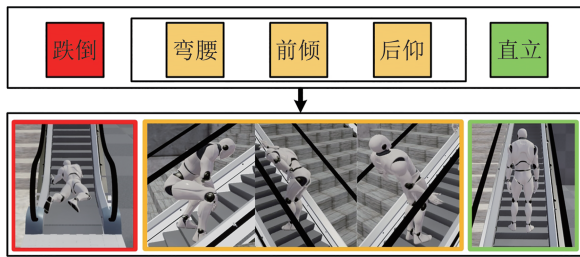


图10 人体姿态分类结果的虚拟人物行为
Fig. 10 Virtual human behavior of human pose classification results

4 实验结果分析

实验环境：数字孪生监测系统的环境为 Windows10 操作系统，处理器 i7 10750H，内存 64 GB DDR4，显卡 NVIDIA RTX3060，虚幻引擎 Unreal Engine4.26。视频分析服务器的配置：Ubuntu20.04 操作系统，TensorFlow1.15.4，处理器 12700H，内存 32 GB DDR4，显卡 NVIDIA RTX3080，固态硬盘 1 TB。视频图像采集装置，具体规格为 800 万像素，1/2.5，供电 DC5V 500 mA，最高支持 2 592 像素×1 944 像素，30 帧，USB3.0 接口，工作温度 -20~70℃；文中视频数据分辨率为 1 280 像素×720 像素，30 帧，24 位真彩色，传输速率 79.1 MB/s。

4.1 自动扶梯监测系统功能测试

本文的监测系统响应时间是衡量数字孪生监测系统的重要指标，快速的响应制动是首要考虑的。对于跌倒的行为结果，可以发现自动扶梯接受急停信号的响应时间在 1.2 s 左右，这个时间远比发生危险情况时人为手动按下自动扶梯急停按钮的反应时间短，这表明该监测系统具有良好的实时性能。同时，虚拟层乘客模型的动作延时在可接受范围内，并且作为三维动态展示也能满足需求。监测系统各部分的响应时间如表 1 所示。

4.2 人体姿态识别结果分析

图 11 为某商城自动扶梯乘客视频的识别结果，视频实时识别的帧率在 30 帧/s 左右，满足实时性

的要求。表 2 中本文方法对比了 2 种自下而上方法的效果，其中平均精确度 AP ， AP^{50} 与 AP^{75} 为 IoU (交并比) 阈值为 50% 与 75% 时的平均精确度， AP^M 和 AP^L 为对应中等目标和大目标的平均精确度，本文的 I-OpenPose 相比原始算法有较大提升。

表1 监测系统各部分响应时间

姿态安全等级	监测系统	虚拟人物	停止
安全	0.877	1.675	无
警告	0.875	1.686	无
危险	0.871	1.619	1.235



图11 I-OpenPose 姿态识别结果
Fig. 11 I-OpenPose pose recognition results

表2 自下而上方法姿态识别效果对比
Table 2 Comparison of attitude recognition effect of bottom-up method %

模型	AP	AP^{50}	AP^{75}	AP^M	AP^L
METU ^[21]	70.5	87.7	77.2	66.1	77.3
OpenPose ^[18]	61.8	84.9	67.5	57.1	68.2
I-OpenPose	65.4	89.7	73.3	61.5	74.7

对于自动扶梯场景中乘客行为的遮挡重叠问题，一直以来是计算机视觉领域面临的难题。如图 12 所示，本文的方法在人体的关键部位受到遮挡后，对乘客姿态识别依然具有很好的效果。

考虑到自动扶梯的踏板是黑色，与乘客的服饰色彩容易混叠，在获取视频图像中选择 300 张具有黑色上衣、黑色下装和全身黑色服饰的乘客数据测试，正确识别率为 99%，识别不出来的图像是在光线较弱场景下扶梯背景与乘客服饰无法分辨。实验表明：在背景中服饰和梯级踏板色彩严重混叠，依然可以识别乘客的姿态，如图 13 所示。



图12 遮挡重叠情况的姿态识别结果
Fig. 12 Attitude recognition results for occlusion and overlap

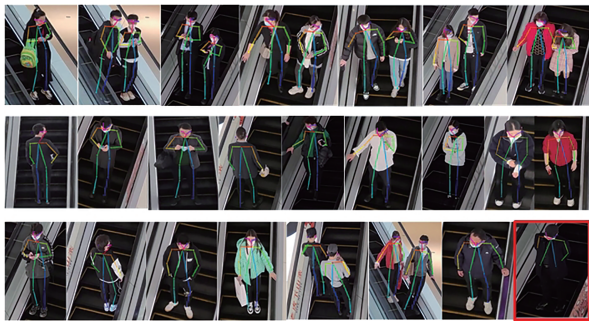


图13 背景色彩混叠情况的姿态识别结果
Fig. 13 Attitude recognition results of background color aliasing

数字孪生的三维监测界面如图14所示, 在测试中, 对于视频图像中存在的遮挡行为, 人体姿态的关键点识别精度有所降低, 图像的平均检测时间37.4 ms, 各部位的识别结果如表3所示。

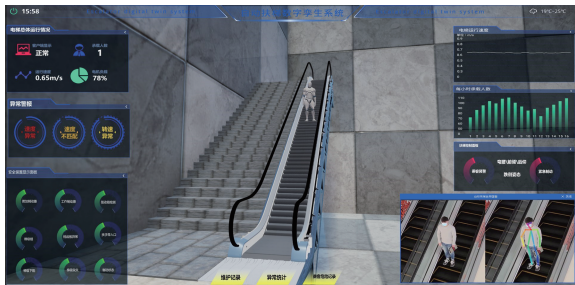


图14 乘客行为监测界面
Fig. 14 Passenger behavior monitoring interface

表3 人体姿态识别结果
Table 3 Human body posture recognition results

图像数量	人体数量	部位	正确率/%	平均耗时/ms
500	1 656	头部	91.4	37.4
		肩部	87.6	
		膝部	70.8	

按照分类的5种姿态各自使用500张图像进行训练, 数据按照分类放在不同的文件夹之下, 通过libsvm库提供的svmtrain进行多分类训练, 训练后的模型通过libsvm库的svmpredict来验证, SVM分类结果如表4所示。为了验证在数字孪生中使用虚拟人物模拟仿真数据和实际数据共同训练的分类器是否具有很好的分类效果, 通过实际的数据去验证分类的正确率, 实验表明: 分类的效果同测试集效果一致, 如图15所示。

表4 SVM分类验证的正确率
Table 4 Accuracy of SVM classification verification

姿态安全等级	姿态分类	分类	平均耗时/ms
		正确率/%	
安全	直立	93.6	0.344
	弯腰	94.6	0.357
警告	前倾	91.8	0.349
	后仰	91.2	0.347
危险	跌倒	98.4	0.351

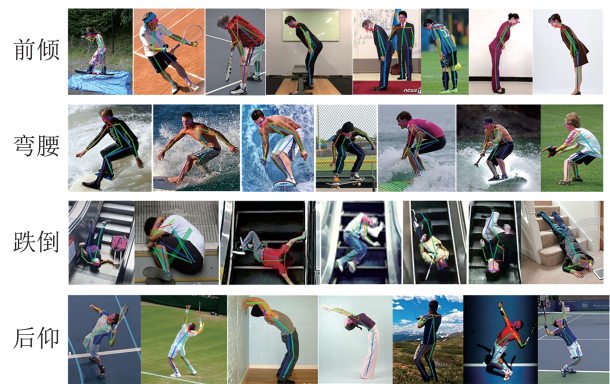


图15 验证分类器效果的实际图像数据
Fig. 15 Actual image data to validate the classifier

5 结论

本文提出了一种基于数字孪生的自动扶梯乘客行为监测方法, 实现了基于数字孪生的自动扶梯乘客行为监测系统的四维模型构建。数字孪生的三维可视化界面生动直观地展示了扶梯设备的运行状态及乘客的行为信息, 实现了对乘客的潜在危险行为的预警, 在跌倒情况发生的第一时间实现扶梯设备的自动停止运行。实验结果表明:

基于数字孪生的乘客行为监测系统具有实时性高、准确性高和交互性强等优点，为自动扶梯的智能化、数字化运行维护提供了一些参考。

对于缺少危险行为数据的问题，利用数字孪生虚拟人物模拟实际行为姿态，解决了现实中缺乏数据的问题，这在实际研究中具有重要的意义。数字孪生目前仍然处于初级阶段，随着理论不断完善，实际应用不断增加，会有更多的领域借助数字孪生技术实现突破。数字孪生在物理规律下摆脱了实际的束缚，站在了更高的维度去发现问题解决问题。

后续会研究基于数字孪生的地铁站、车站等场景中自动扶梯乘客簇拥的行为姿态监测，实现对乘客行为的安全监测预警。

参考文献:

- [1] Tao Fei, Qi Qinglin. Make More Digital Twins[J]. Nature, 2019, 573(7775): 490-491.
- [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] 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.
- [4] 肖通, 江海凡, 丁国富, 等. 五轴磨床数字孪生建模与监控研究[J]. 系统仿真学报, 2021, 33(12): 2880-2890.
Xiao Tong, Jiang Haifan, Ding Guofu, et al. Research on Digital Twin-based Modeling and Monitoring of Five-axis Grinder[J]. Journal of System Simulation, 2021, 33(12): 2880-2890.
- [5] Yang Hanbo, Sun Zheng, Jiang Gedong, et al. Remaining Useful Life Prediction for Machinery by Establishing Scaled-corrected Health Indicators[J]. Measurement, 2020, 163: 108035.
- [6] Cheng Dejun, Zhang Jie, Hu Zhongtai, et al. A Digital Twin-driven Approach for On-line Controlling Quality of Marine Diesel Engine Critical Parts[J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 2020, 21(10): 1821-1841.
- [7] 何慧霞, 魏桂英, 武森, 等. 智能制造评价理论研究现状及未来展望[J]. 中国工程科学, 2022, 24(2): 56-63.
He Huixia, Wei Guiying, Wu Sen, et al. Research Status and Future Prospects of Intelligent Manufacturing Evaluation Theory[J]. Strategic Study of CAE, 2022, 24(2): 56-63.
- [8] 耿艺宁, 刘帅师, 刘泰廷, 等. 基于计算机视觉的行人检测技术综述[J]. 计算机应用, 2021, 41(增1): 43-50.
Geng Yining, Liu Shuaishi, Liu Taiting, et al. Survey of Pedestrian Detection Technology Based on Computer Vision[J]. Journal of Computer Applications, 2021, 41(S1): 43-50.
- [9] 袁庆曙, 王若楠, 潘志庚, 等. 空间增强现实中的人机交互技术综述[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2021, 33(3): 321-332.
Yuan Qingshu, Wang Ruonan, Pan Zhigeng, et al. A Survey on Human-computer Interaction in Spatial Augmented Reality[J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2021, 33(3): 321-332.
- [10] Greco A, Caterino M, Fera M, et al. Digital Twin for Monitoring Ergonomics During Manufacturing Production [J]. Applied Sciences, 2020, 10(21): 7758.
- [11] Bilberg A, Malik A A. Digital Twin Driven Human-robot Collaborative Assembly[J]. CIRP Annals, 2019, 68(1): 499-502.
- [12] 宋学官, 何西旺, 李昆鹏, 等. 人体骨骼数字孪生的构建方法及应用[J]. 机械工程学报, 2022, 58(18): 218-228.
Song Xueguan, He Xiwang, Li Kunpeng, et al. Construction Method and Application of Human Skeleton Digital Twin[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2022, 58(18): 218-228.
- [13] Onan Demirel H, Irshad L, Ahmed S, et al. Digital Twin-driven Human-centered Design Frameworks for Meeting Sustainability Objectives[J]. Journal of Computing and Information Science in Engineering, 2021, 21(3): 031012.
- [14] Havard V, Jeanne B, Lacomblez M, et al. Digital Twin and Virtual Reality: A Co-simulation Environment for Design and Assessment of Industrial Workstations[J]. Production & Manufacturing Research, 2019, 7(1): 472-489.
- [15] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 自动扶梯和自动人行道的制造与安装安全规范: GB 16899-2011[S]. 北京: 中国标准出版社, 2011: 76.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of China. Safety Rules for the Construction and Installation of Escalators and Moving Walks: GB 16899-2011[S]. Beijing: Standards Press of China, 2011: 76.
- [16] 陶飞, 刘蔚然, 张萌, 等. 数字孪生三维模型及十大领域应用[J]. 计算机集成制造系统, 2019, 25(1): 1-18.
Tao Fei, Liu Weiran, Zhang Meng, et al. Five-dimension

- Digital Twin Model and Its Ten Applications[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2019, 25(1): 1-18.
- [17] 金绍勋, 黄继小, 赵志刚, 等. 基于Socket服务器的Zynq平台微型高光谱仪实时视频预览系统[J]. 仪表技术与传感器, 2021(1): 38-42.
Jin Shaoxun, Huang Jixiao, Zhao Zhigang, et al. Video Real-time Preview System of Zynq Platform Micro-hyperspectrometer Based on Socket Server[J]. Instrument Technique and Sensor, 2021(1): 38-42.
- [18] Cao Zhe, Hidalgo G, Simon T, et al. OpenPose: Realtime Multi-person 2D Pose Estimation Using Part Affinity Fields[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2021, 43(1): 172-186.
- [19] 周开伟, 钱雪忠, 周世兵. 一种改进的多分类孪生支持向量机[J]. 计算机应用与软件, 2022, 39(4): 269-274, 299.
Zhou Kaiwei, Qian Xuezhong, Zhou Shibing. An Improved Multi-class Classification Twin Support Vector Machine[J]. Computer Applications and Software, 2022, 39(4): 269-274, 299.
- [20] 梁华刚, 温晓倩, 梁丹丹, 等. 多级卷积特征金字塔的细粒度食物图片识别[J]. 中国图象图形学报, 2019, 24(6): 870-881.
Liang Huagang, Wen Xiaoqian, Liang Dandan, et al. Fine-grained Food Image Recognition of a Multi-level Convolution Feature Pyramid[J]. Journal of Image and Graphics, 2019, 24(6): 870-881.
- [21] Yu F, Koltun V. Multi-scale Context Aggregation by Dilated Convolutions[EB/OL]. (2016-04-30)[2022-01-21]. <https://arxiv.org/abs/1511.07122>.