

刘博, 卿胤波, 韩龙玫, 龙瀛. 基于空间轨迹熵的公共空间活力表征方法研究 [J]. 风景园林, 2022, 29 (1) : 95-101.

基于空间轨迹熵的公共空间活力表征方法研究

Research on Public Space Vitality Representation Based on Space Trajectory Entropy

刘博 卿胤波* 韩龙玫 龙瀛

LIU Bo, QING Linbo*, HAN Longmei, LONG Ying

开放科学 (资源服务)
标识码 (OSID)



中图分类号: TU986.5

文献标识码: A

文章编号: 1673-1530(2022)01-0095-07

DOI: 10.14085/j.fjyl.2022.01.0095.07

收稿日期: 2021-01-30

修回日期: 2021-11-12

刘博 / 男 / 四川大学电子信息学院在读硕士研究生 / 研究方向为计算机视觉

LIU Bo is a master student in the College of Electronics and Information Engineering, Sichuan University. His research focuses on computer vision.

卿胤波 / 男 / 博士 / 四川大学电子信息学院副教授、博士生导师 / 研究方向为人工智能与计算机视觉

通信作者邮箱 (Corresponding author Email): qing_lb@scu.edu.cn

QING Linbo, Ph.D., is an associate professor and doctoral supervisor in the College of Electronics and Information Engineering, Sichuan University. His research focuses on artificial intelligence and computer vision.

韩龙玫 / 女 / 硕士 / 成都市规划设计研究院高级工程师 / 研究方向为城市规划与大数据

HAN Longmei, Master, is a senior engineer in Chengdu Institute of Planning & Design. Her research focuses on urban planning and big data.

龙瀛 / 男 / 博士 / 清华大学建筑学院研究员 / 研究方向为城乡规划技术科学

LONG Ying, Ph.D., is a research fellow in the School of Architecture, Tsinghua University. His research focuses on urban and rural planning technical science.

摘要: 人及其活动是城市公共空间活力的核心, 聚焦人及其活动的公共空间活力测度一直是人本尺度城市研究的难点。针对公共空间活力表征问题, 提出了基于人群轨迹聚类的空间活力表征新方法。该方法采用基于视频的多目标跟踪技术提取人群运动轨迹, 并对轨迹聚类分组处理; 根据轨迹类别的多样性和结构的差异性, 提出了新的“空间轨迹熵”来反映公共空间人群行为模式的丰富度和混合度, 从新颖而简洁的角度来测度人群活动复杂状态, 以表征公共空间活力。以成都市武侯区3个公共空间为研究对象, 用本方法计算出分时段的空间轨迹熵, 结合人工检视探讨了3个场景的空间活力时序变化及成因并给出了空间优化建议。研究结果显示: 该空间活力表征方法可以客观描摹人群时空运动状态, 精准测度时空活力, 有效解决传统活力表征方法时空精细度低等问题, 反映空间中的城市运维现实, 辅助建立人本尺度的空间活力动态评价机制, 为公共空间活力评估、品质优化、场地微更新等城市治理课题提供精准的技术支持。

关键词: 公共空间; 活力; 轨迹聚类; 活动丰富度; 空间轨迹熵

基金项目: 国家自然科学基金 (编号 61871278); 四川省科技计划项目 (编号 2018HH0143)

Abstract: People and their activities are the core of the vitality of urban public space. The measurement of public space vitality focusing on people and their activities has always been a difficulty in human-scale urban researches. In view of the representation of public space vitality, this research proposes a new method of spatial vitality representation based on the crowd trajectory clustering. In this method, the multi-object tracking technology based on videos is used to extract the trajectory of the crowd, which is further clustered based on the trajectory structure. According to the diversity of trajectory categories and the difference of structures, “the space trajectory entropy” is put forward to reflect the diversity and mixing degree of the behavior patterns in public space, and to measure the complex state of crowd activity from a novel and concise perspective, so as to represent the vitality of public space. In this research, three public spaces in Wuhou District of Chengdu City are selected as the research objects. The spatial trajectory entropy of the three scenes is calculated under this method. Combined with manual review, it explores the changes and causes of the time series of spatial vitality of the three scenes and gives spatial optimization suggestions. The results show that the spatial vitality characterization method can objectively describe the temporal and spatial movement of the crowd, precisely reflect the spatial-temporal vitality of space, reflect the exact urban operation and maintenance reality in the space, and contribute to establish a human-scale dynamic evaluation mechanism of spatial vitality. As a result, the proposed work can provide precise technical support for city governance, such as public space vitality assessment, quality optimization and site micro-renewal.

Keywords: public space; vitality; trajectory clustering; activity diversity; space trajectory entropy

Fund Items: The National Natural Science Fund of China (No. 61871278); Science and Technology Plan Project of Sichuan Province (No. 2018HH0143)

1 研究背景

城市公共空间作为市民生活和社交的重要场所，其空间活力是体现市民基本生活福祉的重要指标^[1]。简·雅各布斯^[2]认为“人与人的活动以及生活场所相互交织的过程，即城市生活的多样性，使城市获得活力”。扬·盖尔^[3]也强调了人及其活动是城市公共空间活力的核心，尤其是社交活动和选择性活动。“活力”这一从人和活动出发的空间评价词汇逐渐为城市工作者熟知，并受到了越来越多的重视^[4-5]。精准感知公共空间的人群活动进而准确度量空间活力，提升公共空间品质，提高市民幸福度，是目前城市人本尺度研究的重要课题。

对于公共空间人群活动的观测，基于调查访谈、延时摄影等传统方法大都采用瞬时切片信息，着重于微观尺度公共空间中人流、活动数量的统计，往往难以完整反映人群活动的时间动态变化。近些年兴起的手机信令、基于位置的服务（location based services, LBS）、社交网络等新数据，能有效应用于城市大尺度研究^[6-7]，但在微观尺度观测中存在定位精度低以及下探至个体时遗漏了行为活动等关键信息的问题。

因此，近年来城市研究者^[8]开始利用视频这种直接观测的全时段数据来研究微观尺度公共空间中人的活动。一些研究依托计算机视觉技术刻画公共空间行人时空活动信息，如麻省理工学院（MIT）联合盖尔研究所开展的 Benchmark 项目^[9]利用机器学习算法识别场地影像中的行人数量、活动轨迹以及停留时间。Hou 等^[10]采用深度神经网络检测视频中的目标，并将图像中检测目标区域与现实空间位置维度进行映射变换，进而量化微观尺度公共空间的使用情况。胡一可等^[11]采用特征提取技术提取校园内场景视频中的人群行为轨迹，采用光流法追踪景区共处空间场景视频中的人群行为轨迹并判断人群的通行速度^[12]。丁梦月^[13]运用计算机视觉技术识别人群行为轨迹，结合空间信息，归纳街道步行空间行为原型。

综上所述，视频蕴含着丰富的“人”的时空信息，精确记录了人在空间中的位置和

状态。利用计算机视觉技术充分挖掘微观尺度公共空间视频数据蕴含的丰富的人群动态活动信息，探索时空细粒度量化活力的系统方法，可为精准感知空间人群活动提供强有力的技术支持。

2 研究问题

目前针对微观尺度公共空间的研究，虽然通过引入“视频数据+计算机视觉”解决了传统方法低通量且很难大规模实施的缺点，规避了非视觉大数据的不足，增强了人群信息的粒度和精度，但仍存在一些局限：1）部分研究^[14]仅对人的活动展开单一要素的观测；2）虽然针对人的活动进行了多角度（行人数量、活动轨迹、停留时间、行为类型等）观测的研究^[9, 12]，但是其测度结果未统一量纲，导致分析结果庞杂，空间活力无法计算，进而无法高效地展开多个场地的横向对比和时间轴上的纵向对比，不利于研究者对空间总体状态的全面把控。

公共空间中的人群活动构成一个高度动态化的复杂系统，其活动模式的丰富度和混合度能充分体现非必要性活动的发生量，比单纯的人流量、人口密度更能准确刻画空间的活力状态^[2-3, 15-18]。微观尺度下，基于个体跟踪的精细化人群活动轨迹信息较手机信令、LBS 等定位信息更能体现人群微观尺度的多样化时空行为，是微观尺度空间活力更有效的表征载体。大量研究表明^[9, 11-13, 15]，行为轨迹是描述人群在公共空间中的位置分布及状态的关键信息，它包含丰富的动态活动信息。此外，轨迹数据还包含高维度信息：1）人在公共空间中运动并产生轨迹，轨迹信息在一定程度上反映了空间的要素、形态、界面等特征信息^[13]；2）运动轨迹的多样性在某种程度上代表了行为类型的多样性；3）运动轨迹可以体现人在空间中的活动时长。以上要素都与空间活力直接或间接相关，由此高维度运动轨迹信息可以有效测度活力的高低^[16, 19]。

因此，本研究基于简·雅各布斯和扬·盖尔空间活力理论，从“以人为本”角度出发，借鉴信息学中“熵”的概念，提出“空间轨迹熵”这一新概念来表征空间活力。“空

间轨迹熵”通过描述微观尺度人群轨迹类型多样性和轨迹结构差异混合度，以表征公共空间中人群活动模式的丰富度和混合度，从一个全新而又简洁的维度测度人群的密度、流量、活动发生量、活动丰富度和活动混合度等复杂信息，进而度量人群时空活力。本方法根植于公共空间微观尺度的直观测度，探索基于空间轨迹熵的空间活力表征分析方法，解决公共空间活力研究中人群活动测度粒度不够、数据有偏、时间不连续、量纲不统一等问题，为人本尺度^[20-21]的公共空间研究提供了新思路。

3 研究框架与方法设计

3.1 空间活力、熵、行为轨迹、空间轨迹熵概念辨析

简·雅各布斯和扬·盖尔都强调了人的活动对城市公共空间活力研究的重要性，同时扬·盖尔在其提出的“公共空间—公共生活”（public space & public life, PSPL）研究方法中对多样的非必要性活动予以强烈关注。黄舒晴、徐磊青^[9]反思了大数据时期用人口密度、人流量或街道活动总发生量表征空间活力的不足，提出用代表非必要性活动的“优质活动强度”来表征空间活力，反映了活动的差异性和多样性对街道活力的贡献。因此，微观尺度人群活动的丰富度和混合度是城市活力最直接、最本质的体现，深入探究人群行为活动，有助于表征公共空间活力以及理解公共空间活力的内涵。

“熵”泛指某些物质系统状态的一种量度，其物理意义是体现系统的无序程度。在信息领域，熵体现了信息的未知性和复杂性，反映了信息量的大小；规划领域也用熵来度量用地功能混合度，熵值越大，混合度越高^[22]。

行为轨迹包含人群在公共空间中的位置分布、状态等关键信息^[14]，也包含人在空间中的活动时长、空间行为多样性等关键信息^[11]。显然，轨迹的数量代表了人流量；轨迹的多种形式体现了活动类型的丰富度；而轨迹的杂乱无章则表明行人通行目的性不强，容易与他人或环境产生互动，产生多种非必要性活动，进而带来更高的活力。可以说，

空间中行为轨迹的数量和无序程度与空间的活力成正相关，但是原始轨迹并不能直观表征公共空间活力状态，需要提取高层次的语义信息。

因此，笔者参考信息学中“熵”这一概念，针对小尺度公共空间时空活力难以分析和量化的问题，提出了“空间轨迹熵”这一全新概念，深度挖掘人群轨迹类型的多样性和轨迹结构的差异混合度等高维度信息，反映高度动态化的复杂人群活动，表征公共空间中人群活动的无序状态，进而精准测度公共空间活力。

3.2 模型框架

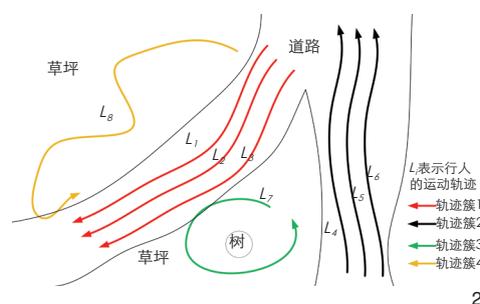
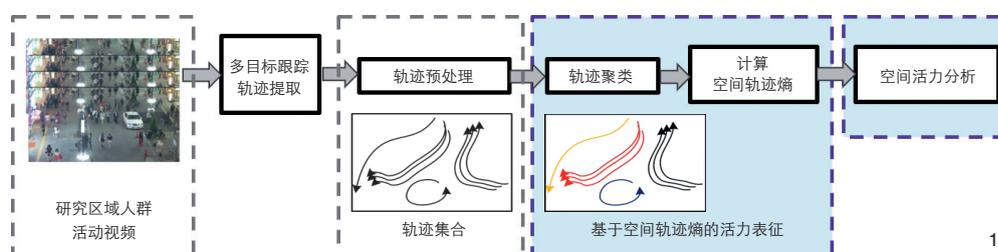
构建基于“空间轨迹熵”的空间活力分析的模型框架(图1)。1)使用多目标跟踪算法提取监控视频中的轨迹数据，并对轨迹数据进行预处理从而得到轨迹集合；2)通过轨迹聚类将集合中形态相似的轨迹聚为一类，实现轨迹的类别划分(如用相同的颜色表示同一类别)，不同的轨迹类簇用于区分公共空间中的活动类别。在此基础上，基于轨迹聚类中心和相似度距离计算所有轨迹的空间轨迹熵，并将之融合作为该空间的综合活力表征(具体方法将在3.3节详细讨论)；3)结合实际规划应用需求，基于目标场景的长时间视频数据，实现特定空间的时空活力分析：通过本研究的方法计算出分时刻的“空间轨迹熵”，形成空间活力变化曲线，结合环境要素、人员构成等要素探讨该目标区域的活力变化表征及成因，最终形成指导空间优化的针对性策略和建议。

3.3 基于空间轨迹分析的活力表征方法设计

3.3.1 人群轨迹与空间活力分析

一方面，人群活动数量是影响空间活力的直接因素^[7, 23]，因此行人轨迹数量是活力的重要表现，每一条轨迹对空间活力都有实质贡献；另一方面，杂乱无章的行为轨迹表明行人较为活跃且通行目的性不强，容易被周边环境吸引^[14, 18]，故人群行为轨迹模式的丰富度与空间活力密切相关。

城市街道、广场或者公园等公共空间中的活动，包括必要的通过型活动和休闲停留等非必要性活动类型^[3, 18]。通过型活动在公



1 基于“空间轨迹熵”的空间活力分析的模型框架

The framework of spatial vitality analysis based on space trajectory entropy

2 空间轨迹聚类图(相同颜色代表同一类轨迹簇)

The spatial trajectory clustering diagram (same color represents same cluster)

共空间内停留时间较短，活动目的性较强，轨迹趋同性强，其轨迹形态具有规律性和相似性；而以休息坐靠、驻足交流、拍照留念等为主的非必要性活动，在某一空间内出现时间较长且活动轨迹的随机性较强、差异较大，其轨迹形态具有随机性和多样性。通过某特定空间轨迹聚类图，展现不同类别轨迹簇(cluster)的结构反映活动的差异性(图2)。代表必要性活动的轨迹簇(如轨迹簇1和轨迹簇2)具有比较规律的运动模式，虽然轨迹簇内的轨迹数量多，但轨迹类型混合度以及运动模式的信息量较低，对空间活力的贡献低；代表非必要性活动的轨迹簇(如轨迹簇3和轨迹簇4)，其轨迹在空间中存在随机性和多样性，运动模式信息量较高，虽然轨迹簇内的轨迹数量少，但对空间活力的贡献高。另外，轨迹簇的种类越多，代表整体空间活动丰富度越高。综上所述，空间轨迹类型、轨迹簇数量也是空间活力的重要体现。

3.3.2 基于“空间轨迹熵”的活力表征设计

基于上述讨论，空间活力除了与传统统计活力方法中的“人数”(即轨迹数量)有关，还与轨迹模式丰富度、轨迹簇数量成正相关。针对某一条特定的轨迹，其与空间中所有类型轨迹相似度越低，活力贡献度越大；空间中轨迹结构差异性越大，活力越大。因此为了表征轨迹在空间中所承载的活力信息，本

研究借鉴信息熵的概念，给出空间轨迹熵的计算公式如下：

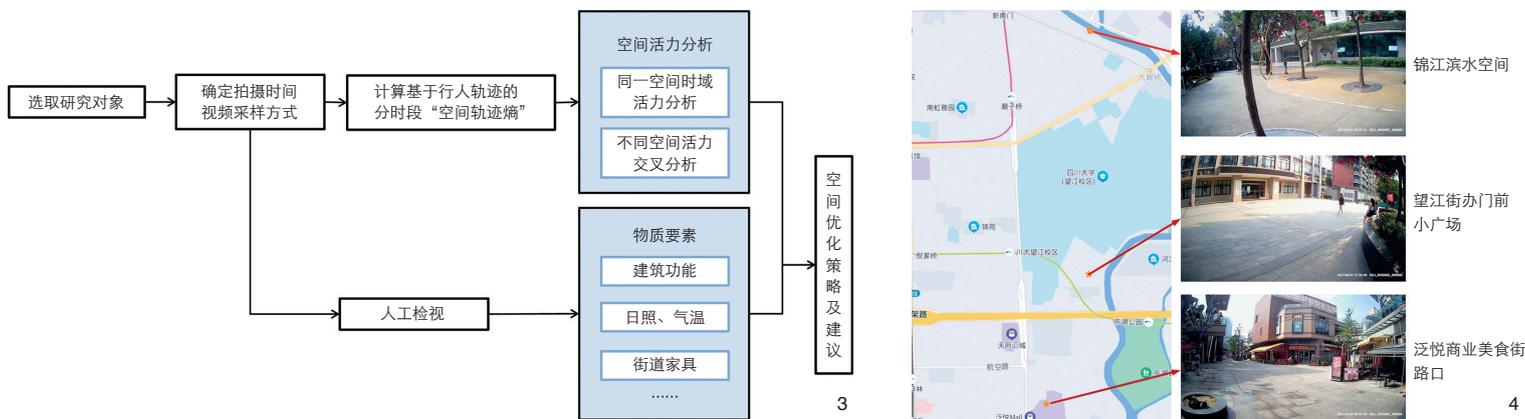
$$p(L_i, L_c) = \frac{\text{Dist}(L_i, L_c)}{\sum_{k=1}^{\text{clus}} \text{Dist}(L_i, L_k)}, \quad (1)$$

$$H(L_i) = -\sum_{c=1}^{\text{clus}} p(L_i, L_c) \log [p(L_i, L_c)], \quad (2)$$

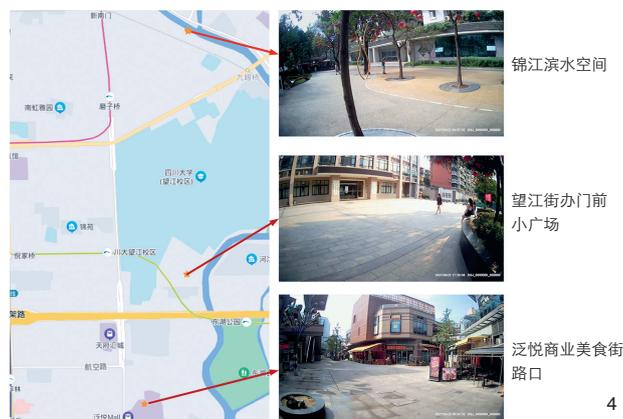
$$H(T_s) = \sum_{i=1}^n H(L_i), \quad (3)$$

式中： $p(L_i, L_c)$ 代表轨迹 L_i 与各个聚类中心 L_c 的相似度距离占比， L_c 表示聚类中心轨迹， $\text{Dist}(L_i, L_c)$ 表示轨迹 L_i 与聚类中心 L_c 的相似度距离。 clus 表示聚类中心轨迹的数量， $\sum_{k=1}^{\text{clus}} \text{Dist}(L_i, L_k)$ 表示轨迹 L_i 与各个聚类中心 L_k 的距离之和。 $H(L_i)$ 表示单条轨迹 L_i 的轨迹熵，同时 $H(L_i)$ 也代表与其他类轨迹结构的差异混合度。 $H(T_s)$ 为整个空间中所有轨迹熵之和，表示当前时间段 T_s 对应的空间轨迹熵，用于对当前时段空间活力的最终表征， n 表示空间中轨迹数量。

根据公式(1~3)，本研究提出的“空间轨迹熵”具有以下特性：1)与其他轨迹结构差异比较大的轨迹，具有较大的轨迹熵值(图2中的轨迹 L_7 、 L_8)；2)由公式(2)可知，轨迹簇数与单条轨迹的空间轨迹熵成正相关；3)由公式(3)可知，空间中轨迹数量增多时，空间轨迹熵值存在上升趋势。



3 基于空间轨迹熵的公共空间活力优化技术路线
The technical roadmap of public space vitality optimization based on spatial trajectory entropy



4 3 个研究对象区位图
The spatial location map of three research objects

综上所述，本研究提出的“空间轨迹熵”通过轨迹数量有效表征空间访问量，通过轨迹簇数有效表征行为活动丰富度，以及通过“熵”的计算有效表征轨迹结构差异性，进而体现活动的混合度，最终实现对时空活力的有效表征。

4 基于空间轨迹熵的空间活力分析应用

本研究从行为活动的丰富度和混合度出发，设计了一种人本尺度下公共空间活力的表征方法，能够解决人本视角下公共空间活力表征这一核心问题。本研究提出的表征方法可对任意时刻的视频段进行空间轨迹熵的分析，进而表征该段视频所蕴含的活力情况。为充分验证本研究设计的基于空间轨迹熵的活力分析方法的有效性，设计公共空间活力技术路线（图 3）：1）选取研究对象，确定拍摄场景的时间以及视频采样方式，对研究对象进行视频拍摄；2）采用本研究设计的基于行人轨迹聚类的活力表征方法计算分时段“空间轨迹熵”，在时间维度和空间维度进行活力分析；3）采用人工检视的方法对视频中建筑功能、街道家具等物质要素进行观测，并考虑日照、气温等因素，结合前述基于空间轨迹熵的空间活力进行综合分析研判，针对性地给出研究对象空间品质优化的具体策略和建议。下面以 3 个小型公共空间为例进行应用分析与探讨。

4.1 基于空间轨迹熵的空间活力分析方案设计

扬·盖尔 PSPL 调查方法提出^[15]，每 1 个小时计数 10 min 可以提供相当精确的城市生活信息，因此本研究选取 10：00—18：00 时段，每 1 h 选取 10 min 拍摄一次，对人们在某区域的活动情况进行一次记录，再通过本研究的方法计算出分小时的“空间轨迹熵”。在此基础上绘制某一个区域的空间活力变化曲线，结合区域的人员构成、环境要素等探讨该区域的活力变化表征及成因；同时，对比不同区域同一天的空间活力曲线，结合街区尺度、用地功能、配套设施等物质构成，探讨可能造成不同区域活力高低的原因，进而形成指导空间优化的针对性策略和建议。

4.1.1 研究区域的选取

本研究选取位于成都市武侯区的 3 个公共空间作为研究对象（图 4），分别为锦江滨水空间、望江街办门前小广场、泛悦商业美食街路口。从视频拍摄角度来看，锦江滨水空间是由左侧锦江、右侧建筑大致围合的区域，场地内分布有较多的行道树和绿化植被；望江街办门前小广场为视野前侧建筑和右侧花坛界定的区域，花坛内有大型乔木和灌木，花坛具备座椅功能，广场内比较空旷，无街道家具；泛悦商业美食街路口为 2 条道路的交汇处，四周均有建筑分布，底层商铺设置有户外就餐区，道路上设有路灯、花台等街道家具。

4.1.2 研究时段的选取

研究选取 2021 年 6 月 22 日周二 10：00—18：00 时段，每小时选取 10 min 进行一次拍摄，对人们的活动情况进行一次记录。拍摄当日气温 28℃~35℃，早晚清凉舒适，中午和下午较热。

4.1.3 研究技术方案及计算结果

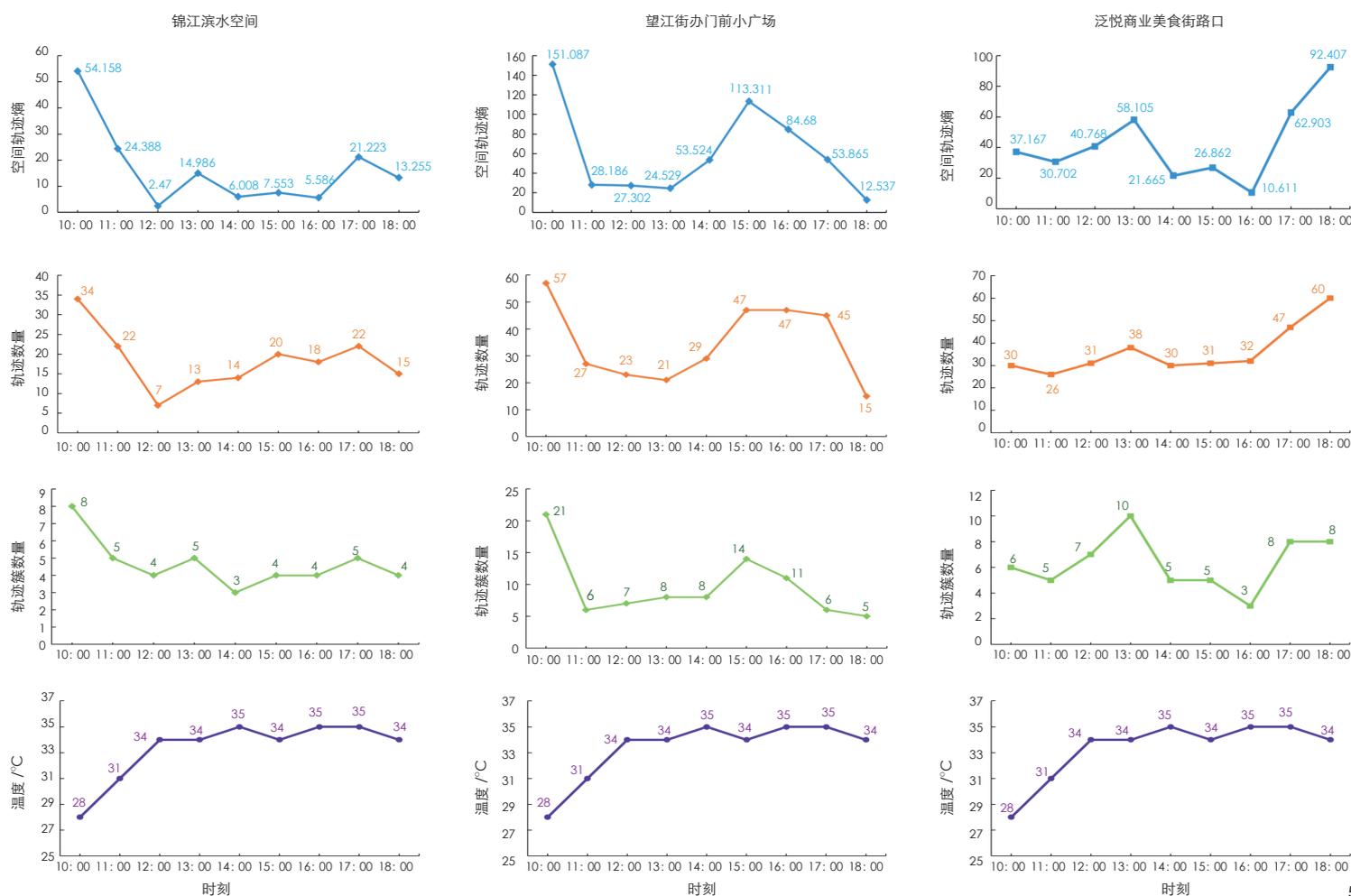
本研究采用多目标跟踪算法^[24]提取上述时段的人群轨迹数据，为了减少目标检测过程中轨迹点的漂移，对轨迹点进行 3：1 下采样，同时针对水平视角视频采用垂直方向均化处理以减少抖动误差，由此得到最终的预处理轨迹数据。基于此，采用轨迹结构相似性^[25]计算任意 2 条轨迹的相似性距离，并采用密度聚类方法 DBSCAN^[26]进行轨迹聚类。最后，基于此数据利用 3.3 节提出的活力表征方法计算出分小时的“空间轨迹熵”、当前时间段的轨迹数量以及聚类轨迹簇数，得到空间活力时序变化曲线对比图（图 5、6）。

4.2 3 个空间时空活力分析

4.2.1 同一空间时空活力分析

对视频数据进行空间轨迹熵计算后，结合对原始视频人工检视，上述 3 个场地当天的活力变化有以下特点：

1) 锦江滨水空间属于城市休闲空间，工作日 10：00 前有许多老年人在此晨练和散步，因此空间活力较高。随着时间推移和温度升高，天气变得炎热，而场地中行道树形成的树荫较少，建筑也呈现关闭状态，区域内只



5 3 个视频场景空间轨迹熵和相关要素的时序变化

The time series variation of spatial trajectory entropy and related elements in three video scenes

有少数目的性较强的通行活动，因此，该场地 11:00—18:00 时间段内保持较低的活力，计算的空间轨迹熵较低。

2) 望江街办门前小广场位于大型居住区内，周围分布着菜市场、餐饮、诊所、培训、汽修、织补等各种生活服务类商铺。其中，10:00 和 15:00 的人流比较大，许多居民和工作人员进出街道办事处，或在花台附近参加社区活动招募，或出于买菜、遛弯等目的途经广场，活动人数和活动丰富度的增加使空间轨迹熵达到峰值。

3) 泛悦商业美食街路口毗邻写字楼，包含不同方向穿行的上班族以及商家服务人员，白天时段会保持稳定的人流。在 12:00—13:00 的午餐时段和 17:00—18:00 的晚餐时段，随着空间人数的大幅增长和活动类型

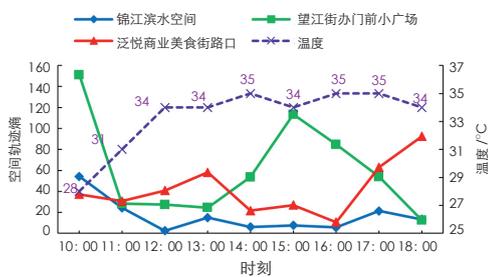
的略微增加，其空间轨迹熵相继达到了小高峰和最高峰；下午 14:00—16:00 餐饮店处于休息状态，就餐人员和服务人员都较少，活力较低；18:00 随着气温降低、遮蔽区域扩大、户外小摊贩出现，人群的活动类型和活动轨迹都显著增多，活力较高，空间轨迹熵值也较高。

综上所述，人工检视与计算结果非常吻合，证明本方法能有效地反映空间的活力变化。轨迹数约等于人流量，轨迹簇大致反映了活动类型的丰富度，轨迹数和空间熵的曲线趋势大致相同（图 5），但某些时段轨迹数和空间熵的值存在明显的差异，说明人流量可以大致反映空间活力，但轨迹数（人流量）叠加轨迹簇（活动类型）计算出的空间熵能更加精准、真实地反映空间活力的情况。

4.2.2 不同空间活力交叉分析

对 3 个场地的轨迹熵做对比分析（图 6），结合图 5 可以明显看到，空间中某时段即使拥有相同的人流量，也会由于轨迹结构和活动类型的差异而导致活力状态的显著不同，由此也印证了黄舒晴和徐磊青强调的“仅用人流量来描述活力是不准确的”这一观点^[6]。

具体来说，15:00 的望江街办门前小广场（图 7-1）和 17:00 的泛悦商业美食街路口（图 7-2）空间中含有相同运动轨迹数 47 条，空间轨迹熵前者接近后者的 2 倍（前者 113.311，后者 62.903）。结合人工视频检视可知，望江街办门前小广场有大量居民和工作人员从各个方向进出街道办事处，部分行人从树荫下通行，老年人在树荫下休憩，这些休闲活动的轨迹具有不确定性和复杂性，



6



空间轨迹熵 113.311, 47 条轨迹, 14 类簇 7-1



空间轨迹熵 62.903, 47 条轨迹, 8 类簇 7-2



空间轨迹熵 54.158, 34 条轨迹, 8 类簇 7-3



空间轨迹熵 37.167, 30 条轨迹, 6 类簇 7-4



空间轨迹熵 151.087, 57 条运动轨迹, 21 类簇 7-5

7

6 3 个空间活力时序变化曲线对比

The comparison of time series change curves of the vitality in three spaces

7 5 个典型视频场景空间活力分析

Spatial vitality analysis of five typical video scenes

7-1 15: 00 的望江街办门前小广场

15: 00, small square in front of Wangjiang Sub-district Office

7-2 17: 00 的泛悦商业美食街路口

17: 00, Fan-Yue Commercial Food Street Intersection

7-3 10: 00 的锦江滨水空间

10: 00, Jinjiang waterfront space

7-4 10: 00 的泛悦商业美食街路口

10: 00, Fan-Yue Commercial Food Street Intersection

7-5 10: 00 的望江街办门前小广场

10: 00, small square in front of Wangjiang Sub-district Office

与通行轨迹有明显的差别。而在泛悦商业美食街路口中，行人运动轨迹仍是以直接通过型较多，并不能贡献太多空间活力。复杂多样的轨迹导致望江街办门前小广场的轨迹类别多达 14 类簇，而泛悦商业美食街路口仅 8 类簇，体现了明显的活力差异，空间轨迹熵也很好地表征了这一差异。

上午 10: 00，锦江滨水空间（图 7-3）和泛悦商业美食街路口（图 7-4）的运动轨迹数基本相同（前者 34 条，后者 30 条），但前者的轨迹熵值更高（前者 54.158，后者 37.167）。锦江滨水空间轨迹类簇共 8 类，泛悦商业美食街路口的轨迹类簇共 6 类。结合人工检视可知，在锦江滨水空间视频中，有散步的行人，有几位老人打太极，座椅附近有一位家长带着孩子在玩耍，滨水空间中丰富的休闲类活动显著提高了空间活力；而在泛悦商业美食街路口空间视频中，往返通行的行人较多，路口行人运动趋势有细微差异，但是行人运动速度快、停留少，导致复杂运动模式

较少，空间活力也随之下降，最终计算出的空间轨迹熵也真实、有效地体现了两者的活力差异。同样是上午 10: 00，望江街办门前小广场（图 7-5）的空间轨迹熵为本次观测的最高值 151.087，空间中含有 57 条运动轨迹，轨迹类型共 21 类簇。视频显示此时段花台附近有社区招募活动，部分居民和街办工作人员在此停留和徘徊，同时也吸引其他散步的路人围观，导致轨迹类型明显增加，大幅提高了空间活力，这与本研究方法计算的空间轨迹熵达到峰值完全吻合。

4.2.3 分析结论与规划建议

综合上述 3 个场地的分析结果可知，本研究方法可以高效地感知场地中的人群活动，采用基于“空间轨迹熵”的活力表征方法能精准反映微观尺度的空间活力变化，在时间和空间维度得到量纲统一、可对比分析的数据，利于研究者迅速建立起对空间状态的整体认知和把控，为进一步的场地分析和优化策略提供有效的技术支持。

结合空间轨迹熵的计算结果及原始视频的人工检视，对上述 3 个场地有以下优化建议：1) 空间周边丰富的建筑功能会产生丰富的行人活动，单一或关闭的建筑功能则使场地活动单调且时间利用率低下。促进城市用地功能或建筑功能复合化能显著提升公共空间活力。2) 温度和日照对人群活动影响较大。夏日 30°C 以上的阳光直射会对无遮蔽的空间中的人群活动产生明显的阻碍效应。气温下降和建（构）筑物形成的遮阴区域增加后，人群活动数量和类别明显增加。可采取增加可移动遮蔽设施、栽种落叶乔木等方法提高场地对季节和温度的适应性、应对性。3) 老城区人均公共空间面积不足的问题已被广泛认识，而公共空间的时间利用率低下加剧了市民的空间匮乏感。在老城区用地紧张、面积增加困难的情况下，对空间进行优化以促进场所分时合理利用是值得关注的议题。例如，白天增加遮蔽设施促进中老年人、儿童对空间的使用，傍晚和夜间通过通勤路线的合理

规划增加上下班人群对空间的访问,增加绿道的连通性以满足夜跑人士的需求等。4) 空间中的“触媒”活动能显著影响人群活力。比如社区招募活动、小商贩开摊等,像在一汪湖水中投入一块石头,会产生向外扩散的涟漪效果,进而产生丰富的活动和轨迹。这种“触媒”活动不完全受空间物质的影响,而与合理的政策导向更相关,如社区活动组织、户外摆摊许可等。公共空间的优化除了从物质构成要素上加以改善,更应注重软件的建设。

5 总结与讨论

本研究聚焦于人群活动的小尺度空间活力研究,根据公共空间中视频轨迹数据提出一种新颖的方法来分析空间活力和活动轨迹的相关性,引入动态活动信息推演个体与空间交互场景,采用量化分析反馈空间状态,从而提高了此方法的可移植性和泛化能力。通过对3个场景中的行人轨迹展开研究,对多个空间轨迹熵和空间活力进行对比分析,实验表明轨迹熵对公共空间活力表征分析具有现实意义和可解释性。本研究参考成熟的PSPL观测法设计具体实践方法,选取3个不同类型空间采取每1h抽样10min的方案,分析和探讨场地空间维度和时间维度的空间活力差异和变化,并给出了空间优化的建议。后续还可结合特定对象、特定时段进行更细时间粒度的活力分析,进而可以结合随机事件、关键事件等要素对空间活力展开精细化分析。本方法聚焦于人,回归人的根本,可应用于微观尺度的城市公共空间活力评估、空间品质提升、社区微更新等场景,践行“以人为本”的人本尺度设计理念。

本研究工作也存在不足,如缺少结合多视角数据探究空间活力的数据以及缺乏实验结果分析的验证等问题:1) 视频拍摄视角不同可能导致视频数据蕴含的实际场景尺度不一致,未来将考虑结合投影变换技术,将各个场景进行标定,并在此基础上进一步分析轨迹定量研究;2) 针对实验结果验证问题,后续将考虑结合专家打分或者问卷调查等方式进行相关性的实验验证;3) 本研究主要聚

焦于公共空间中活动的行人,空间位置长时间完全静止的行人由于不存在空间轨迹,暂未纳入考虑,如何考虑长时间驻留人群对空间活力的影响,从而完善空间活力表征,也是在未来工作中需要研究的问题。

致谢 (Acknowledgments):

感谢清华大学博士生侯静轩,四川大学副教授王正勇老师,四川大学卿澜波实验室的硕士生计浩浩、李林东、牛通、晋儒龙、文虹茜、王昱晨、肖雷鸣、姜雪、黄江岚等对本研究视频拍摄提供的相应支持,以及对文章撰写提出的宝贵修改意见。

参考文献 (References):

- [1] SHI J G, MIAO W, SI H. Visualization and Analysis of Mapping Knowledge Domain of Urban Vitality Research[J]. Sustainability, 2019, 11(4): 998.
- [2] JACOBS J. The Death and Life of Great American Cities[M]. New York City: Vintage Books, 1961.
- [3] 盖尔·交往与空间[M]. 何人可,译.北京:中国建筑工业出版社,1992.
- [4] 蒋涤非.城市形态活力论[M].南京:东南大学出版社,2007.
- [5] 阿龙多琪,马航,杨彪.2000年以来我国公共空间活力研究进展[J].现代城市研究,2020(10):123-130.
- [6] 丁浪,魏薇,楼子帅.基于APP高精时空数据的城市空间运动活力研究:以杭州为例[C]//中国城市规划学会·持续发展 理性规划:2017中国城市规划年会论文集.北京:中国建筑工业出版社,2017:13.
- [7] 龙瀛,周珉.街道活力的量化评价及影响因素分析:以成都为例[J].新建筑,2016(1):52-57.
- [8] 韩龙玫,卿澜波.视频大数据在城市公共空间规划领域的应用前景探索[J].四川建筑,2017,37(3):12-15.
- [9] WILLIAMS S, AHN C, GUNC H, et al. Evaluating Sensors for the Measurement of Public Life: A Future in Image Processing[J]. Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science, 2019, 46(8): 1534-1548.
- [10] HOU J X, CHEN L, ZHANG E J, et al. Quantifying the Usage of Small Public Spaces Using Deep Convolutional Neural Network[J]. PloSONE, 2020, 15(10): e0239390.
- [11] 胡一可,丁梦月,王志强,等.计算机视觉技术在城市街道空间设计中的应用[J].风景园林,2017,24(10):50-57.
- [12] 胡一可,李晶.基于旅游者和日常访问者人群行为的城市型景区“共处”空间研究[J].中国园林,2019,35(6):61-66.
- [13] 丁梦月.基于计算机视觉技术的城市街道步行空间人群行为原型研究[D].天津:天津大学,2018.
- [14] 杨柳,胡一可.城市型风景名胜入口空间构成与人群行为研究[J].中国园林,2018,34(S2):134-139.
- [15] 盖尔,吉姆松.公共空间·公共生活[M].汤羽扬,王兵,威军,译,何人可,欧阳文,校.北京:中国建筑工业出版社,2003.
- [16] 黄舒晴,徐磊青.社区街道活力的影响因素及街道活力评价:以上海市鞍山社区为例[J].城市建筑,2017(11):31-34.

[17] 罗桑扎西,甄峰.基于手机数据的城市公共空间活力评价方法研究:以南京市公园为例[J].地理研究,2019,38(7):1594-1608.

[18] 盖尔,斯娃若.公共生活研究方法[M].赵春丽,蒙小英,译.北京:中国建筑工业出版社,2016.

[19] 耿慧志,朱笠,杨春侠.上海陆家嘴中心区公共绿地的城市活力解析[J].城市建筑,2017(16):21-23.

[20] LONG Y, YE Y. Measuring Human-scale Urban Form and Its Performance[J]. Landscape and Urban Planning, 2019, 191: 103612.

[21] 龙瀛,叶宇.人本尺度城市形态:测度、效应评估及规划设计响应[J].南方建筑,2016(5):41-47.

[22] SONG Y, KNAAP G-J. New Urbanism and Housing Values: A Disaggregate Assessment[J]. Journal of Urban Economics, 2003, 54(2): 218-238.

[23] 刘颂,赖思琪.大数据支持下的城市公共空间活力测度研究[J].风景园林,2019,26(5):24-28.

[24] WOJKE N, BEWLEY A, PAULUS D. Simple Online and Realtime Tracking with a Deep Association Metric[C/OL]//2017 IEEE International Conference on Image Processing (ICIP). IEEE, 2017: 3645-3649(2017-03-21)[2018-02-22]. <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8296962>. DOI: 10.1109/ICIP.2017.8296962.

[25] 袁冠,夏士雄,张磊,等.基于结构相似度的轨迹聚类算法[J].通信学报,2011,32(9):103-110.

[26] ESTER M, KRIEGEL H-P, SANDER J, et al. A Density-Based Algorithm for Discovering Clusters in Large Spatial Databases with Noise[C]//SIMOUDIS E, HAN J W, SAMAL U. KDD'96: Proceedings of the Second International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining. Palo Alto: AAAI Press, 1996: 226-231.

图片来源 (Sources of Figures):

文中图片均由作者绘制;图4、7原始视频由人工智能与感知城市实验室(Artificial Intelligence and Senseable City Lab)学生拍摄;图4地图截自百度地图(2021年11月11日)。

(编辑/王一兰 李卫芳)