

引用格式:袁林旺,俞肇元,罗文,等. PIR 传感网数据的几何代数建模与行为分析[J].地球信息科学学报,2020,22(1):21-29. [ Yuan L W, Yu Z Y, Luo W, et al. Geometric algebraic modeling and movement behavior analysis of the PIR sensor network[J]. Journal of Geo-information Science, 2020,22(1):21-29. ] DOI:10.12082/dqxxkx.2020.190552

# PIR 传感网数据的几何代数建模与行为分析

袁林旺<sup>1,2,3</sup>, 俞肇元<sup>1,2,3</sup>, 罗文<sup>1,2,3</sup>, 袁帅<sup>1,2,3</sup>, 周春焜<sup>1,2,3</sup>

1. 虚拟地理环境教育部重点实验室 南京师范大学, 南京 210023;
2. 江苏省地理环境演化国家重点实验室培育建设点, 南京 210023;
3. 江苏省地理信息资源开发与利用协同创新中心, 南京 210023

## Geometric Algebraic Modeling and Movement Behavior Analysis of the PIR Sensor Network

YUAN Linwang<sup>1,2,3\*</sup>, YU Zhaoyuan<sup>1,2,3</sup>, LUO Wen<sup>1,2,3</sup>, YUAN Shuai<sup>1,2,3</sup>, ZHOU Chunye<sup>1,2,3</sup>

1. Key Laboratory of Virtual Geographic Environment, Nanjing Normal University, Ministry of Education, Nanjing 210023, China;
2. Cultivation Base of State Key Laboratory of Geographical Environment Evolution, Jiangsu Province, Nanjing 210023, China;
3. Jiangsu Center for Collaborative Innovation in Geographical Information Resource Development and Application, Nanjing 210023, China

**Abstract:** Existing research on human behavior based on the PIR (Passive InfraRed) sensor data is limited by the spatial-temporal distribution of motion, clustering, and so on. The reconstruction of behavior trajectory and analysis of semantic features are relatively few, so it is urgent to develop new modeling and behavior analysis methods for the PIR data. This paper attempts to reconstruct the spatial and temporal trajectories by using the PIR (Passive InfraRed) sensor monitoring data. PIR sensors have the characteristics of low price and privacy protection. However, because only Boolean logical response sequence can be obtained by PIR sensors, it is difficult to accurately obtain movement trajectories. Its application has been relatively limited, and it is difficult to conduct movement behavior feature analysis. Traditional PIR sensor network analysis methods are mostly based on the signal extraction idea, which cannot integrate geometric features and semantic information at the same time. By introducing the geometric algebra theory, the sensor scene network can be constructed to realize the path expression and calculation of dynamic network in the geometric algebra space. This paper analyzed the characteristics of human movement features and semantic features, established semantic units, and realized the transformation from spatial data to semantic features. The spatial and topological characteristics of individual and crowd movements were analyzed. We proposed a generation and transformation-based methods of algebraic structures in the geometric algebra system, which provides a new idea and mathematical basis for solving non-deterministic problems such as the PIR sensor network data based analysis, and can provide reference for the construction of internet of things GIS.

**Key words:** geometric algebra; PIR; sensor network; movement trajectory; trajectory extraction; semantic template; movement semantics; movement behavior analysis

收稿日期:2019-09-27;修回日期:2019-11-26.

基金项目:国家杰出青年科学基金项目(41625004);国家自然科学基金项目(41571380、41601417)。[ **Foundation items:** National Science Fund for Distinguished Young Scholars of China, No.41625004, National Natural Science Foundation of China, No.41571380, 41601417. ]

作者简介:袁林旺(1973—),男,江苏海安人,博士,教授,主要从事GIS理论与方法研究。E-mail: yuanlinwang@njnu.edu.cn

\*Corresponding author: YUAN Linwang, E-mail:yuanlinwang@njnu.edu.cn

**摘要:**现有基于PIR(Passive InfraRed)传感器数据的人体行为研究主要局限于运动时空分布、聚类等,对行为轨迹的重建和语义特征的解析相对较少,亟需发展新的建模与行为分析方法。本文尝试利用室内区域PIR传感器监测数据进行时空轨迹重构及其所揭示的运动语义特征研究。本文引入几何代数理论方法,构建传感器场景网络,实现了几何代数空间下动态网络的表达与路径计算,分析了人体运动特征及语义特征,建立最小语义单元,实现了空间数据到语义特征的转化,并可对个人和群体运动的空间区域特征和拓扑特征分析提供支撑。论文将传统PIR传感器网络分析从以几何、统计等为主的信号提取,转变为基于几何代数系统中不同类型代数结构的生成与转化问题,为诸如PIR传感网数据分析一类的非确定问题的求解提供了新的思路和数学基础,可为物联网GIS的构建提供借鉴。

**关键词:**几何代数;PIR;传感器网络;行为轨迹;轨迹提取;语义模板;运动语义;运动行为分析

## 1 引言

传统时空轨迹主要基于GPS数据,但受定位精度以及接收卫星信号环境的约束,使得该数据难以支撑精细的行为模式以及室内环境的人体移动轨迹和行为分析<sup>[1-3]</sup>。以视频监控等为基础的行为传感器投入代价高,难以大范围布设,且无法应用于个人隐私敏感的特定区域,导致难以获取空间上连续的观测数据<sup>[4]</sup>。PIR(Passive InfraRed)传感器以其低价稳定等特点,可以进行大规模部署<sup>[5]</sup>。但PIR传感器只能获取布尔型的逻辑响应序列,难以精确获得准确的行为轨迹。许多研究试图从PIR传感器数据特征的角度来探索人类运动轨迹<sup>[6-8]</sup>。滤波器、分类器、聚类模型和概率模型等已有的应用,通过将PIR传感器数据转换为可识别的人类运动,探索信号序列之间的关系<sup>[9-10]</sup>。上述研究主要集中在PIR传感器响应序列的时空分布特征、聚类和索引方法研究,对行为轨迹的重建和语义特征的解析研究相对较少,无法应对基于室内、特定公共场所等小尺度时空轨迹分析。发展新的PIR行为传感器数据的建模与分析方法是提升PIR传感器应用于行为建模的关键。

基于PIR传感网数据的行为特征建模与分析关键需要解决如下三大科学问题:①传感器响应序列与网络结构约束的同步建模;②PIR传感器动态追踪与轨迹重建;③基于PIR传感器序列行为的语义解释。对于问题①,传统的网络表达和轨迹表达多基于地理坐标,在时空维度下进行处理比较困难,如何建立具有时空分布的传感器数据与室内复杂场景的结构约束,实现传感器响应数据序列、网络拓扑结构、行为轨迹在时空上的关联关系并形成统一的表达模型是其关键。对于问题②,基于布尔逻辑

运算的PIR传感器序列的轨迹重建是不定性问题<sup>[11-12]</sup>,即相同的传感器响应序列可以对应不同的行为轨迹,如何遍历所有可能的轨迹并进行筛选是其关键。对于问题③则需要综合行为轨迹和传感器响应序列的映射关系,形成响应的行为语义库,进而实现从海量数据中不同行为轨迹的高效筛选。上述3个问题都属于非传统意义上的GIS或信息科学问题,在以欧氏几何和低维空间中很难直接进行建模和求解。

几何代数是一种结合代数,其以维度运算为基础,将对象表达与计算拓展到更为复杂的维度空间,从而实现几何问题的代数化求解。几何代数内蕴的多重计算空间和对高维运算的内蕴支持可以很好地实现对包含传感器响应数据、网络拓扑和人群行为轨迹整体表达,由于几何代数对不同类型数据的表达均为代数基在不同映射下构造形成的代数结构,因此可以在统一的数学框架下实现对PIR上述各类数据的整体建模<sup>[11,13-18]</sup>。在几何代数中,代数结构的构造可以同时用几何关系、代数结构和函数方程三种形式进行同步表达,因而可以很好的融入各种时空约束,并通过含约束的代数方程实现代数空间中结构的动态构造,因而可以为复杂场景中的动态对象的演化模拟提供基础。由于几何代数以维度运算和布尔运算作为其计算基础,其计算具有高度的结构性特征,可为PIR传感器的轨迹重建和语义求解提供较好的支撑<sup>[13]</sup>。几何代数在GIS等相关领域的研究基础也可以为PIR传感器的数据管理和分析提供良好的环境支撑。

本文针对PIR传感器建模和分析研究所面临的关键问题,通过引入几何代数方法对PIR传感器数据进行系统建模,引入几何代数工具,提出了网络拓扑-行为轨迹-场景约束一体化的动态场景时空一体化数据模型,实现PIR传感器网络拓扑、时空响

应数据序列和行为轨迹的代数化统一表达。以传感器响应的时空关系为基础进行网络连通性的判定,基于几何代数算子建立了传感器数据驱动的行人轨迹场景寻径的代数化表达与路径遍历模型,从0/1响应关系的PIR被动传感器记录中提取出满足时空约束条件的行为轨迹,实现了基于PIR传感器响应序列的行为轨迹重构算法。在此基础上,通过对PIR几何代数数学结构的分类解析,构建人体运动行为的语义模板,将人体运动过程的时空关系转化至语义特征空间,实现基于PIR传感器响应序列的人体行为语义识别方法,为未来人体行为认知与模拟研究提供新的思路和方法。

## 2 整体框架与关键技术

面向PIR传感器数据的建模与分析的整体框架如图1所示,主要包括网络几何代数空间构建、特征轨迹重构和运动语义特征分析3个步骤。利用几何代数空间的可定义可配置的特性,构建内嵌传感场

景约束的网络空间,并构建相应的节点、路径表达方法和路径延拓方法,实现传感器网络中可行路径的计算;面向二值化的传感器0/1响应数据,通过时间窗划分将其转换为结构化的响应序列,利用网络空间中的外积运算,实现传感器响应序列的运动轨迹重构;行为分析模块主要运用了几何代数子空间的自生成性,构建所有可能运动轨迹模板,构建相应的模板匹配方法,求得运动行为,并可对其行为特征加以分析。

### 2.1 传感器几何代数网络空间构建

室内空间传感器布设往往会受到室内空间约束的影响,使得传感器的响应存在一定的空间关联性(即只有空间邻接的传感器才会依次响应)。可引入图论的思想,以传感器作为网络节点,节点间的连通关系取决于传感器的邻接性,从而将整个室内传感器空间转化为网络结构,则人体的运动轨迹即可转化为传感器网络的路径表达。PIR传感器网络模型表达主要包括传感器节点、弧段、路径、权重

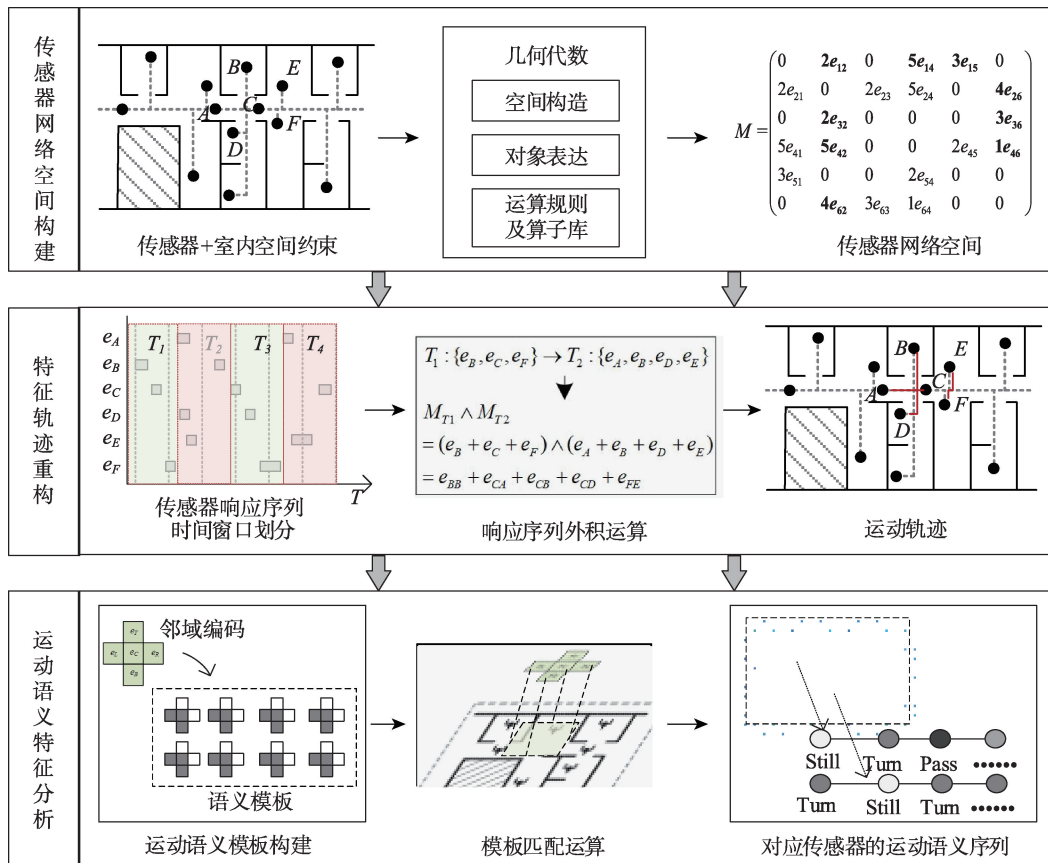


图1 面向PIR传感器数据的建模与分析的整体框架与技术路线

Fig. 1 Overall framework and technical flowchart of the PIR-based modeling and analysis

等要素。利用几何代数原理,将传感器网络投影至几何代数空间,构建高维几何代数网络,每个维度代表一个节点,用几何代数基向量表达,网络弧段基于基向量间外积运算构造并表达,多重向量综合表达多条路径,可用于表征节点与节点之间的路径(图2)。

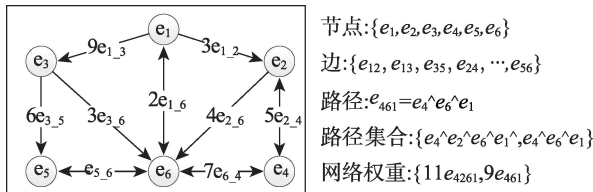


图2 基于几何代数的网络表达

Fig. 2 Network expression based on the geometric algebra

根据传感器节点间的连通关系构建基于几何代数的邻接网络矩阵,利用该矩阵约束网络中路径的延拓运算,实现任意传感器节点间可行路径的求解。基于几何代数的邻接网络矩阵内蕴了路径生成的计算结构,利用外积运算,可实现低阶邻接矩阵向高阶邻接矩阵的转换。此外,由于邻接矩阵的外积运算是相互独立的,可在路径生成时实时更新权重信息,并通过添加约束条件的方式筛选出与目标跟踪无关的路径,从而减少数据冗余,实现计算效率的优化。

## 2.2 运动特征轨迹生成

传感器的响应序列,是人类行为在场景中运动所激发的传感器响应结果对上述数据的作用,是以时间和空间为变量,对上述数据的一个映射。由于室内传感器响应结果的无目标标签特性使其具有内在的不确定性,即传感器只能探测对象经过的状态,并不能记录经过传感器的特定对象,甚至无法辨别运动对象为个体还是群体,因此无法准确获取每个人长时间的真实运动轨迹。但人的行为特征在语义上具有很强的连贯性和整体性,利用PIR传感器网络中传感器响应序列时空上的关联及顺序特征,对海量数据进行约束性建模与轨迹分析有助于提取出潜在的人群行为轨迹。

由于对象的运动具有连续性,可认为轨迹中的传感器节点必须是在传感器网络中相互连通的,而在传感器响应序列中则表现为响应时间上的邻接性。因此,可以将轨迹重建问题转换为包含时间、空间约束的动态网络路径生成问题。该问题不仅涉及到相关的网络算法,也需要同时融入时间、空

间约束,传统的欧氏几何/向量代数在几何关系及轨迹的表达上具有局限性,难以准确描述运动轨迹、传感器网络以及传感器响应序列之间的时空响应关系。为此,作者团队提出了基于时空约束的生成-滤波方法,通过将每个网络局部的时间响应序列数据及其空间关系作为关键的约束条件,利用外积运算生成所有可行路径,并利用约束条件对生成的所有可行路径进行动态滤波<sup>[19]</sup>。

## 2.3 运动语义的特征模板匹配

利用传感器响应序列可重构出连续的人体的运动轨迹,但该连续轨迹不利于运动语义的分析,为此需要将运动轨迹加以划分,得到语义分析的最小单元。基于几何代数的轨迹编码结构,可方便地实现不同研究尺度运动语义单元的构建。此外,传统的运动语义分析方法往往存在运动语义分类体系不完整、分类界限模糊等问题,基于几何代数子空间的自生成特性,可构建所有可能的运动语义单元,再根据约束条件和分类语义对其加以筛选,得到所有可能的语义模板。

为此,我们设计了基于几何代数、顾及传感器响应序列时空约束的模板匹配方法。利用几何代数的代数结构,对空间基本单元内的不同运动状态进行几何代数编码和语义解析,建立基本语义单元,形成单元语义模板库。对突发事件情境驱动下的人体运动轨迹进行分解、编码和语义转化,形成特定事件下的语义集,将其作为训练区数据。以兴趣点相关的兴趣时刻定义时间分析窗口,以模板大小定义传感器网络空间窗口,根据传感器响应时间与响应先后顺序划定前、后响应序列,在此基础上,建立语义模板匹配计算规则,计算前、后响应序列构成的运动编码,利用定义的编码规则对最小语义单元解释得到最终人体运动语义。最后,结合多个训练区数据,建立几何代数语义训练模型,实现对未知语义的轨迹行为认知。

## 3 实证分析

### 3.1 研究数据

本文采用三菱电气研究实验室(Mitsubishi Electric Research Labs, MERL)采集的传感器数据作为数据源<sup>[20]</sup>,传感器分布于实验楼7楼和8楼,共计213个传感器,观测时间为1年的连续监测(时间区间:2006年3月21日—2007年3月24日),共记

30 239 000条轨迹记录。传感器记录数据分为4个部分,传感器id、目标探测起始时间、目标探测终止时间以及传感器响应情况。从传感器的特性上看,每个传感器都是独立的单点观测,可以感知是否有人经过,在一定程度上可以获取全局人员位置的统计信息,但由于传感器所获取的信息内容存在局限性,使得获取的第一手传感器数据难以直接投入应用和分析。本文利用传感器网络分布数据与实验室区域平面图及进行数据配准,建立传感器网络之间的邻接关系。室内环境及传感器分布如图3所示。

### 3.2 传感器网络建模

为了建立动态传感器网络,需要对传感器网络的节点状态以及约束进行动态表达(图4)。在高维几何代数空间下,建立基于几何代数的邻接网络矩阵 $M'$ ,为减小空间复杂度,采用十字链表的方式进行存储。由于节点与节点之间路径通常不只一条,因此引入路径集概念,采用多重向量结构进行路径集表达。并构建了基于邻接矩阵的路径动态延拓方法,可实现基于连通性、最小维度、无回路以及必

经节点等约束路径动态拓展。最后定义了指定约束下的规则更新算子,为生成-滤波式的轨迹生成算法提供基础算子支撑<sup>[11,19,21]</sup>。

### 3.3 行为轨迹重建与语义分析

从网络空间的传感器网络几何代数表达,到基于邻接矩阵外积运算的路径生成,几何代数为轨迹重构提供了一套完备的规则。将人体运动的特性与传感器网时空约束窗口结合,利用基于时空约束的生成-滤波方法实现空间目标的轨迹重构。此外,基于空间统计学的方法,从人体运动的热点区域、轨迹中同一起点与终点之间的通行量、人体运动的轨迹趋势和概率分布、人体活动的时间规律以及不同时段内人体的活动区域范围和热点走向等多个行为轨迹特征分析角度,对人们的行为规律作总结分析。基于MERL的数据分析显示,基于几何代数和生成-滤波范式的轨迹生成方法可以很好的再现室内人群行为的轨迹信息,可支撑日常行为和社会网络等应用(图5(a))。

在传感器所揭示的行人运动语义特征的分析8

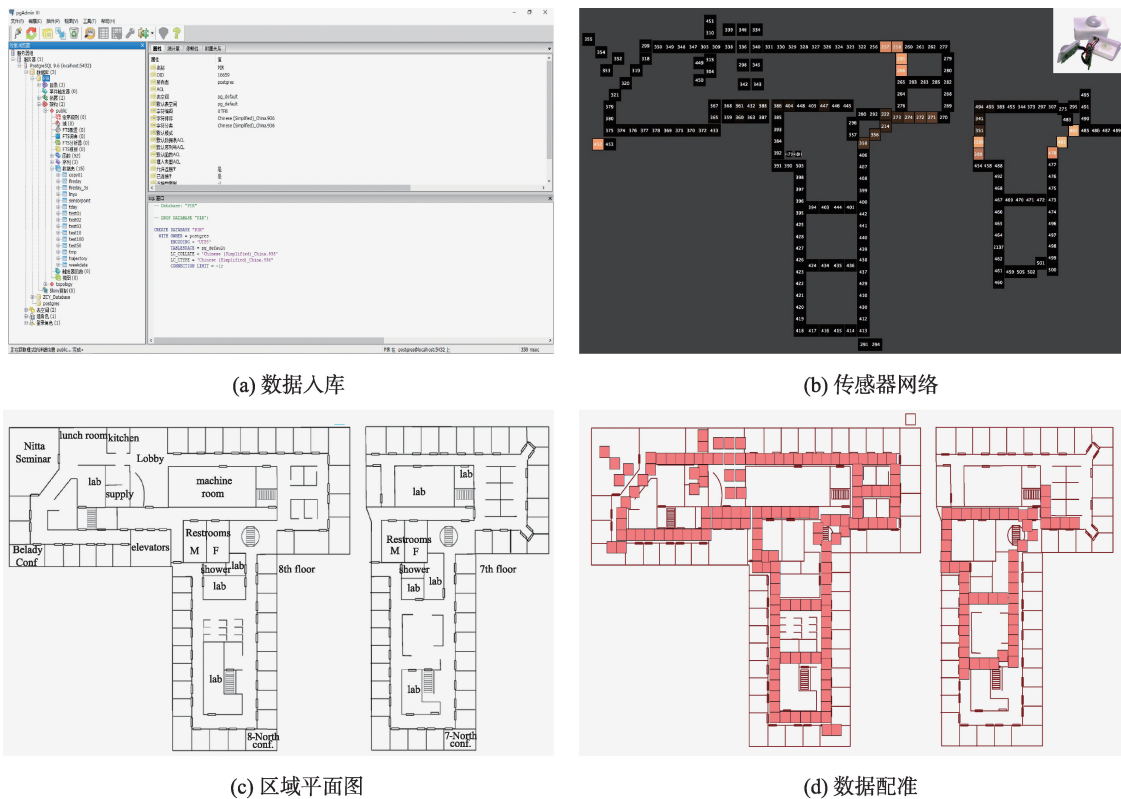
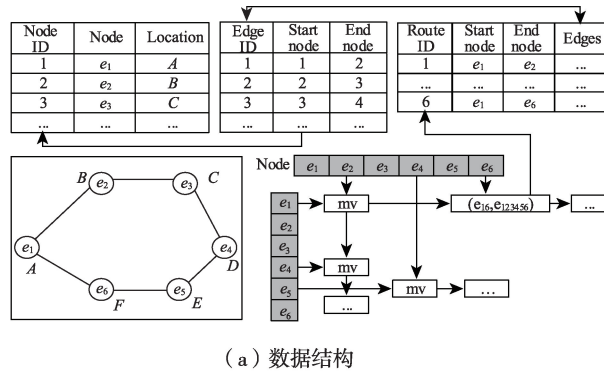


图3 案例数据及可视化

Fig. 3 Case study data and its visualization



(a) 数据结构

邻接矩阵: $M_{ij}^n = \begin{cases} \langle M_{ij} \rangle_n & i, j \text{间} n \text{阶连通} \\ 0 & i, j \text{间} n \text{阶不连通} \end{cases}$
计算规则: $\begin{cases} p(a,b) \wedge p(b,c) = p(a,c) \\ p(a,b) \wedge p(d,f) = 0 \end{cases}$ 连通性扩展规则
$\begin{cases} p(a,c) = p(a,b) \wedge \min_c(p(b,c)) \\ p(a,b) \wedge p(b,a) = 0 \\ p(a,b) \wedge t_i = 0 \end{cases}$ 最小维度扩展规则
无回路规则
必经节点规则
路径延拓: $Q^n = Q^{n-1} \wedge \hat{M}^1 = Q^{n-2} \wedge M^1 \wedge M^1 = Q^1 \wedge \dots \wedge M^1$
规则更新: $\begin{cases} Q_{ij}^n = Q_{ij}^n + Q_{ij}^{n-1} & grade(q_{ij}^n \cup q_{ij}^{n-1}) > \max(grade(q_{ij}^n), grade(q_{ij}^{n-1})) \\ Q_{ij}^n = Q_{ij}^{n-1} & grade(q_{ij}^n \cup q_{ij}^{n-1}) = grade(q_{ij}^{n-1}) \\ Q_{ij}^n = Q_{ij}^n & grade(q_{ij}^n \cup q_{ij}^{n-1}) = grade(q_{ij}^n) \end{cases}$

(b) 核心规则

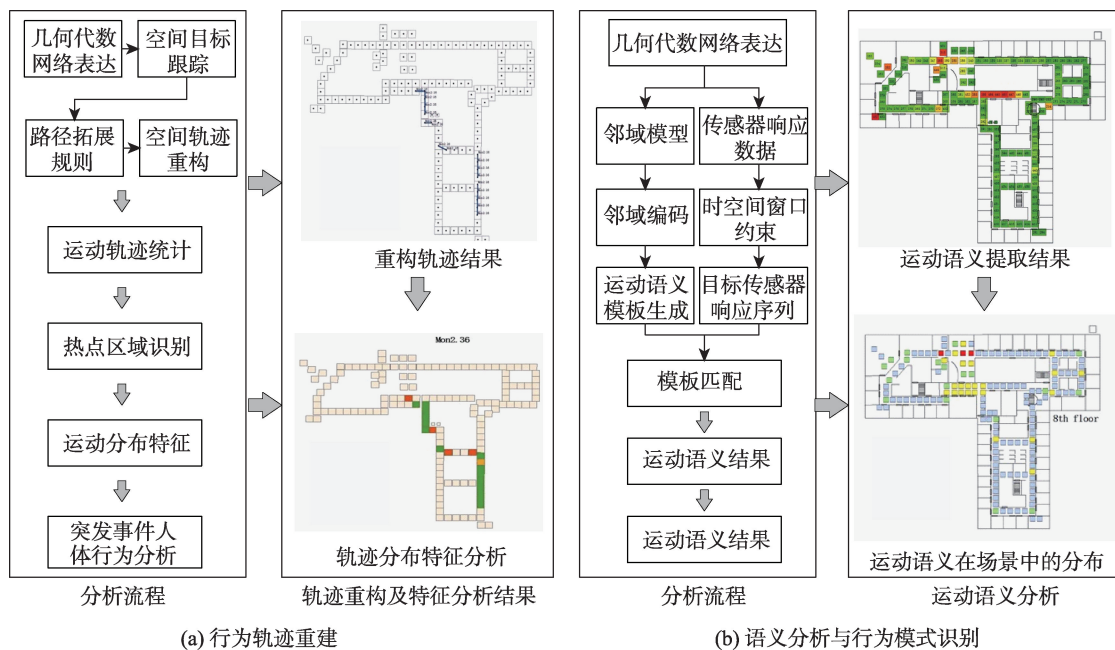
图4 传感器网络几何代数模型

Fig. 4 Geometric algebraic model of sensor networks

种不同运动语义类型的匹配模板。根据PIR传感器网络和预定义规则,定义并提取轨迹语义所使用的空间约束窗口和时空约束窗口,利用运动语义的模板匹配方法提取出传感器网络中响应序列的所有可能的轨迹语义。基于MERL实验数据,选择了一天中所有的传感器响应数据,提取其运动语义,并将语义结果同场景中通道类型进行比对与验证,结果表明本文方法对目标行为的提取具有较高的正确性,可有效反映个体与群体在场景中的行为模式(图5(b))。

### 3.4 火灾事件中的人体行为模式分析案例

为了更好地验证所提取语义结果的准确性,选取MERL事件日志中的火灾演练事件数据与一般工作日数据作对比试验,研究特殊事件对人体行为模式造成的运动影响,验证基于几何代数的模板匹配方法所得语义结果与特定事件下的人类行为模式的一致性。据MERL事件日志,选取2006年4月20日,下午12:50—12:58的数据作为火灾模拟数据,同时选择无特殊事件的一般工作日(2006年4月13日)的同一时段数据作为对照样本,分析结果如图6所示。图6(a)结果显示,火灾疏散模拟时段的语义行为发生频数远大于一般工作日的该时段语义行为频数。图6(b)所示为语义频数最高的静

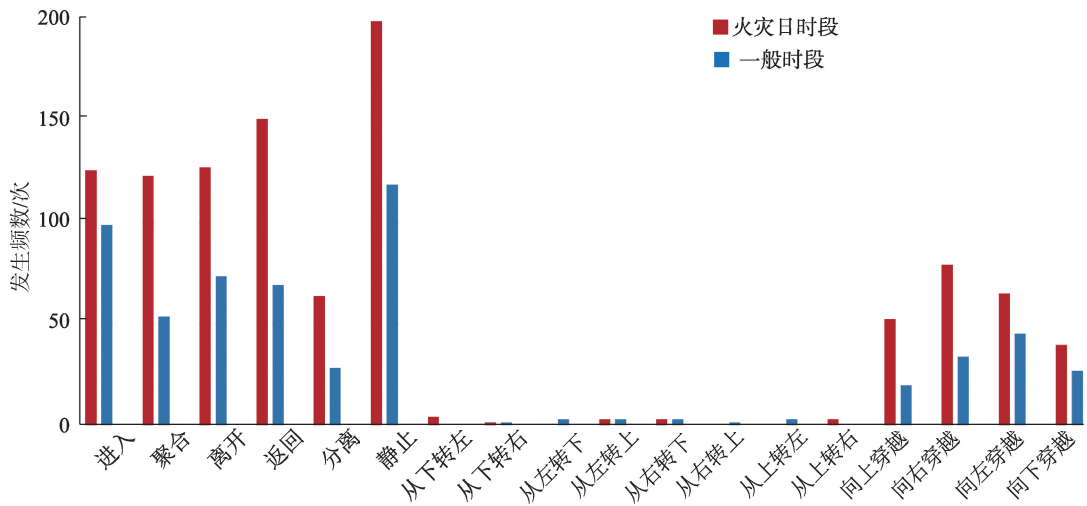


(a) 行为轨迹重建

(b) 语义分析与行为模式识别

图5 传感器轨迹重建与行为语义分析模型

Fig. 5 Sensor trajectory reconstruction and movement semantic analysis model



(a) 火灾时段和一般时段语义发生频数



(b) 火灾时段和一般时段语义分布

图6 火灾时段和一般时段语义分析结果对比

Fig. 6 Comparison of semantic analysis results between the fire time and general time periods

止语义和穿越语义的空间分布情况。从静止语义上看,一般工作日由于室内人员活动的规律性,静止语义平均分布在“restroom”、“kitchen”和“elevator”

等会存在较长时间停留的公共活动场所,而在火灾日,静止语义集中分布在“Nitta Seminar”和“BeladyConf”2个会议室出入口附近,这可能反映了

火灾逃生过程中会议室人流较大而导致的拥堵情况;从穿越语义上看,火灾日在频度更高的同时,分布也更加均一,几乎覆盖了所有可通行区域,该结果也与室内逃生过程中人体的运动模式相一致。综上所述,人们的移动语义会受到一些突发事件的影响,而基于本文方法的分析结果也很好地印证了该结论。

## 4 结论与讨论

利用高密度、低成本的PIR传感器进行人群行为轨迹的定位与重建是物联网时代人群行为检测的重要方向。PIR传感器通过0/1响应序列确定附近是否有行人通过,并通过不同传感器响应序列的时空关系实现人体行为轨迹的识别。本文引入几何代数工具,提出了网络拓扑-行为轨迹-场景约束一体化的动态场景时空一体化网络模型,实现PIR传感器网络拓扑、时空响应数据序列和行为轨迹的代数化的统一表达。以传感器响应的时空关系为基础进行网络连通性的判定,基于几何代数算子建立传感器数据驱动的行人轨迹场景寻径的代数化表达与路径遍历模型,实现了从只有0/1响应序列的PIR被动传感器中提取行人运动的所有轨迹信息。本文提出了基于PIR传感器网络响应序列数据的行为轨迹重构算法,实现了日本三菱实验室内长时段人群行为运动特征的重建与分析。PIR传感器数据是一组离散激活响应序列,看似没有任何语义,但是通过在约束下的数据挖掘,可以揭示传感器响应序列间的关系。本文充分利用了几何代数的表达和操作优势,构建了基于几何代数子空间的语义模板生成方法,然后,引入空间和时空约束,对整个传感器网络和传感器数据进行分段,利用相关几何代数算子,实现语义模板匹配,上述分析流程为人体轨迹语义的提取提供了一个标准范例。

本文方法是通过时空滤波来提取运动语义,时空窗口大小的设置会很大程度影响分析结果,虽然我们根据行人的一般情况设置了默认的步行速度(1.3 m/s),但在不同的通行条件下速度可能会发生变化。例如,在拥挤的情况下,人们的行走速度会下降,在1.3 m/s的平均步行速度阈值下可能会将缓慢移动解析为“静止”语义。在未来的工作中,需要进一步研究不同场景下的移动语义,并利用当前节点邻域节点的语义对结果加以分析改进。

几何代数为表达传感器网络和轨迹重构提供了强大的数学基础,使用此类工具,传感器激活响应序列可以表示为几何代数表达,该表达可反映真实运动且可用于路径延拓运算,可进一步用于轨迹提取和语义分析。基于几何代数的语义分析方法将语义解析的过程变成了模板编码和匹配的过程,该方法完全避免了运动语义库的不完备和分类界限模糊性的问题,并且其可定制的编码范式,使运动语义具备可扩展性。未来可进一步将该方法与物联网数据的实时访问相结合,为传感器数据分析提供了实时可行的方法,为探索基于PIR传感器的人体运动模式开拓了新思路。

### 参考文献(References):

- [1] Guo S, Xiong H, Zheng X, et al. Activity recognition and semantic description for indoor mobile localization[J]. *Sensors*, 2017,17(3):649.
- [2] Kulshrestha T, Saxena D, Niyogi R, et al. SmartITS: Smartphone-based identification and tracking using seamless indoor-outdoor localization[J]. *Journal of Network and Computer Applications*, 2017,98:97-113.
- [3] Pittet S, Renaudin, Valérie, Merminod B, et al. UWB and MEMS based indoor navigation[J]. *Journal of Navigation*, 2008,61(3):369-384.
- [4] D' Apuzzo N. Surface measurement and tracking of human body parts from multi-image video sequences[J]. *ISPRS Photogramm, Remote Sensing*, 2002,56(5):360-375.
- [5] Wong B, Zhang T, Aghajan H. Extracting patterns of behavior from a network of binary sensors[J]. *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, 2015,6(1):83-105.
- [6] Yang D, Xu B, Rao K, et al. Passive Infrared (PIR)-based indoor position tracking for smart homes using accessibility maps and a-star algorithm[J]. *Sensors*, 2018,18(2):332.
- [7] Jin X, Sarkar S, Ray A, et al. Target detection and classification using seismic and PIR Sensors[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2012,12(6):1709-1718.
- [8] Zappi P, Farella E, Benini L. Tracking motion direction and distance with pyroelectric ir sensors[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2010,10(9):1486-1494.
- [9] Shrivastava N, Mudumbai R, Madhow U, et al. Target tracking with binary proximity sensors: Fundamental limits, minimal descriptions, and algorithms[C]//Proceedings of the 4th International Conference on Embedded Networked Sensor Systems[C]. *SenSys 2006*, Boulder, Colo-



- rado, USA, 2006.
- [10] Yang B, Wei Q, Zhang M. Multiple human location in a distributed binary pyroelectric infrared sensor network[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2017:S1350449517300324.
- [11] Yuan L, Yu Z, Luo W, et al. Clifford algebra method for network expression, computation, and algorithm construction[J]. *Mathematical Methods in the Applied Sciences*, 2014,37(10):1428-1435.
- [12] 王健健,冯琳耀,朱帅,等. PIR 传感器网络中行为轨迹重构的几何代数方法,电子学报,2016,44(6):241-247. [ Wang J J, Feng L Y, Zhu S, et al. Geometric algebraic method for behavior trajectory reconstruction in PIR Sensor networks[J]. *ACTA Elect onica sinica*, 2016,44(6): 241-247. ]
- [13] Yuan L, Yu Z, Luo W, et al. Geometric algebra for multidimension-unified geographical information system[J]. *Advances in Applied Clifford Algebras*, 2013,23(2):497-518.
- [14] Schott R, Staples G S. Generalized zeon algebras: Theory and application to multi-constrained path problems[J]. *Advances in Applied Clifford Algebras*, 2011:1-13.
- [15] Wren C R, Minnen D C, Rao S G. Similarity-based analysis for large networks of ultra-low resolution sensors[J]. *Pattern Recognition*, 2006,39(10):1918-1931.
- [16] Hitzer E, Nitta T, Kuroe Y. Applications of clifford's geometric algebra[J]. *Advances in Applied Clifford Algebras*, 2013,23(2):377-404.
- [17] Schott R, Staples G S. Dynamic geometric graph processes: adjacency operator approach[J]. *Advances in Applied Clifford Algebras*, 2010,20(3-4):893-921.
- [18] Yu Z, Luo W, Yuan L, et al. Geometric algebra model for geometry-oriented topological relation computation[J]. *Transactions in GIS*, 2016,20(2):259-279.
- [19] Yu Z, Yuan L, Luo W, et al. Spatio-temporal constrained human trajectory generation from the pir motion detector sensor network data: A geometric algebra approach[J]. *Sensors*, 2016,16(1):43.
- [20] Wren C R, Ivanov Y A, Leigh D, et al. The MERL motion detector dataset[C]// *Workshop on Massive Datasets*. Nagoya, Japan, 12 November 2007:10-14.
- [21] 冯琳耀.基于室内传感网数据的行为轨迹几何代数建模与特征分析方法[D].南京:南京师范大学,2015. [ Feng L Y. The GA modeling and feature analyzing method of motion trajectory based on indoor sensor network data[D]. Nanjing: Nanjing Normal University, 2015. ]