

移动轨迹数据的可视化

蒲剑苏, 屈华民, 倪明选

(香港科技大学计算机学院 香港)

(jspu@ust.hk)

摘要: GPS、RFID 和无线通信设备的爆炸状发展, 让人们有可能搜集到大量的车辆、人群等的移动轨迹数据(简称轨迹数据), 这些数据在交通管理、流动性分析、路线推荐等很多领域有着重要的应用。轨迹数据同时包含空间和时间属性, 数据量大且维度高, 分析起来难度很大。可视化技术可以直观地呈现多维时空轨迹数据, 并提供丰富的互动, 以揭示数据中包含的时空规律。文中总结了轨迹数据的可视化技术的研究现状, 介绍了多个应用案例。

关键词: 移动轨迹数据; 可视化分析; 时空数据分析

中图法分类号: TP391

Survey on Visualization of Trajectory Data

Pu Jiansu, Qu Huamin, and Ni Lionel

(Department of Computer Science and Engineering, The Hong Kong University of Science and Technology, Hong Kong)

Abstract: Trajectory data are increasingly becoming available to researchers due to the advances in technologies like GPS, RFID, and wireless communication devices. Mining or analyzing trajectory data is important in many different applications such as transportation management, mobility study, route suggestion, and mobile communication management. However, as trajectory data contain both spatial and temporal attributes and are often huge in size and high in dimensionality, trajectory data analysis is a very challenging task. Visual analytics solutions show great potential as they can intuitively present multidimensional spatio-temporal trajectory data and provide rich interactions, allowing users to explore the data and improve mining processes and results. In this survey, we first introduce the research problem and summarize key challenges in the visual analysis of trajectories. Then we continue with some background knowledge on trajectory data including data characteristics, collection, processing, and calibration. After that we summarize typical trajectory analysis methods, related visual presentations, and interactive system frameworks. Major visualization techniques for trajectories will be reviewed and discussed in the following section. Then we present state-of-the-art applications such as transportation management, mobility intelligence of drivers, and route suggestion. Finally, we conclude our survey with several future research directions.

Key words: trajectory data; visual analytics; spatio-temporal data analysis

随着定位、跟踪和存储技术的快速发展, 人们已经能够搜集大量的车辆、动物和人的移动轨迹数据(简称轨迹数据)。对这些数据进行分析可以有效地帮助人们了解一个城市的交通状况、动物的活动习

性和人的移动规律。轨迹数据的分析是一项难度很大的工作, 其具有时空特性, 而且数据量大、维度高。轨迹数据是一种采样数据, 往往面临采样率低、误差范围大等问题, 对其的分析可以采用数据挖掘的

收稿日期: 2012-07-31。蒲剑苏(1985—), 男, 博士研究生, 主要研究方向为信息可视化、可视化分析; 屈华民(1969—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为可视化、计算机图形学、医学成像; 倪明选(1950—), 男, 博士, 讲座教授, 主要研究方向为高性能体系结构、并行计算、分布式计算技术、高速网络、操作系统、无线传感网络。

方法. 但因为轨迹数据本身具有时空特征, 可视化方法往往可以最直观地展现这些轨迹. 另外, 可视化方法还可以用来对轨迹数据中的错误进行修正, 发现轨迹中多维属性之间的关系, 并探索数据中隐藏的时空规律.

本文首先简要介绍轨迹数据的重建与校准; 然后重点从轨迹的空间属性的可视化、轨迹的时间属性的可视化、轨迹其他相关属性的可视化、可视系统中的用户交互以及一些代表性的可视化系统 5 个方面讨论轨迹数据的可视化技术; 最后介绍轨迹数据可视化技术在交通管理、流动性分析、导航分析等领域的应用.

1 轨迹数据的重建与校准

移动轨迹可被定义为由移动实体在空间移动时产生的路径. Spaccapietra 等^[1]用“空间-时间路径”来明确定义“轨迹”, 得到了其他学者的认可^[2-4]. 轨迹数据往往需要进行预处理, 其中最常见的预处理是轨迹的重建和校准.

1.1 轨迹重建

搜集 GPS 嵌入式移动设备产生的数据, 处理该原始数据, 获取移动物体的轨迹, 保存轨迹到相应的库(轨迹数据库或数据仓库)的过程被称为轨迹重建. 轨迹重建是一个具有挑战性的问题, 因为轨迹重建的准确性高度依赖于原始数据的质量, 而相邻轨迹位置的距离可以从几米到几百米不等; 然后要找到一条合适的曲线来连接采样点, 这种方法被称为

插值. 线性插值是最快和最简单的方法之一, 通常采用直线连接不同的采样点. 轨迹重建往往采用线性假定, 即不同实体在相同的采样点之间移动时, 相等的时间将导致在空间中移动相同的距离^[5].

1.2 数据校准

在路线建议、交通监控、流量预测等应用中需要一个高采样率的轨迹数据集, 以减少不确定性和得到更精确的结果. 但这些轨迹数据在实践中总是有很多的位置误差和相对较低的采样率, 导致在分析中出现不确定性. 地图匹配算法是一种通过地图来辅助轨迹重建的方法, 被广泛应用于轨迹数据校准和修正, 可有效地提高导航系统的性能^[6].

2 轨迹数据的可视化技术

轨迹数据具有时空属性和许多其他属性, 如速度、方向、高度等, 可视化技术可以用来直观地表现其中的一种或多种属性. 如何将多种属性集成到一个显示图上以揭示这些属性之间的联系, 以及如何解决大量轨迹数据所带来的视觉混淆, 是轨迹数据可视化面临的挑战.

2.1 轨迹的空间属性的可视化

轨迹的空间属性一般是移动物体在空间中的位置及该位置周围的地理情况^[5]. 最初的显示轨迹的方式是简单地在地图上显示孤立的 GPS 记录点, 如图 1a 所示. 早期众多研究者多使用这种方法来调查探讨实体独立的活动, 从而在地图上找到有重要分析意义的位置, 例如活动停止的位置.

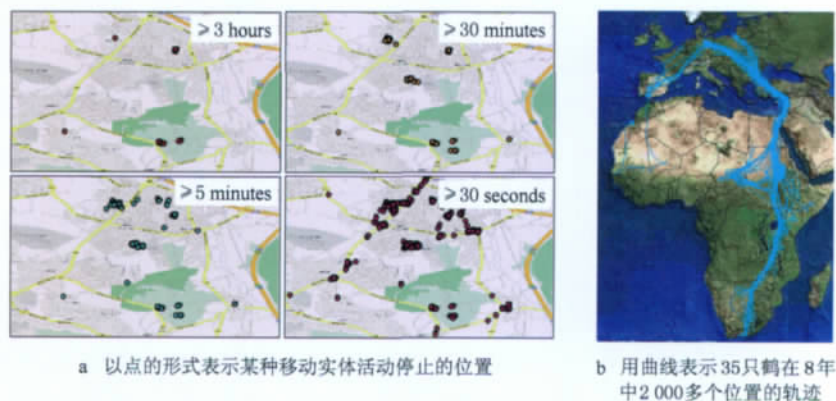


图 1 轨迹空间属性的 2 种表示方法

随着定位技术的进步, 由原始的记录点形成的曲线或线条能更好地表示运动的轨迹. 研究人员通过使用插值来研究不完整的轨迹数据集, 提供连续的轨迹, 如图 1b 所示. 除了那些使用地图作为背景

来直接标识轨迹数据的可视化方法外, 研究人员已开发出了新的数据转换技术, 能更好地揭示与表达轨迹中包含的一些规律与趋势. Crnovrsanin 等^[7]提出一种数据转换方法, 可将数据的原始位置变换到

一个抽象的空间,使地理信息转化为有意义的多元数据。通过对数据中实体和一些重要的位置之间的距离进行计算得到这个抽象的空间,这些重要位置的范围可以是一个单一(或多个)的固定点、一个(或多个)移动的,甚至实体之间的距离。这种方法通过结合这些抽象的视图与实际空间上分布的情况进行分析,提供了一种帮助分析人员建立从抽象空间映射回现实空间的方法。

2.2 轨迹的时间属性的可视化

时间表达具有一种在粒度上的层级系统,包括秒、分钟、小时、天、周、月、年、世纪等。时间包含自然循环周期,其中一些规律在某种程度上可以预测,如季节;其他一些不寻常的规律包括社会周期或经济周期。当数据涉及时间时,动画显示通常被视作分析的第一选择,许多研究者选择用动画方式来展示轨迹的演变。动画地图被广泛用于移动数据的可视化^[8-9];但也有有的心理学研究认为动画不一定优于静态展示^[5]。

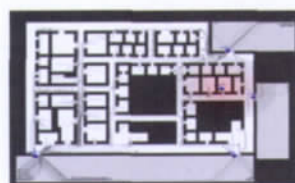
在进行时空属性相关的可视化分析设计时,通常会使用颜色来对不同的时间段进行分类。Willems 等^[10]采用可视化船舶运动轨迹的密度图来研究轨迹的多元性。如图 2 所示的轨迹密度图是一个混合了 4 种密度的图,每种密度代表每天的四分之一时间段,用于该密度图的色彩定义如下:凌晨以后是深蓝色的,早上是明亮的黄色,下午是暗黄色,晚上则是明亮的蓝色。此外,色彩饱和度用来表示不同区域的密度疏密,色调则由那些密度最高的时间段决定。图 2 显示了主要航线在白天最常用,而在夜晚航线发生偏离的情况。



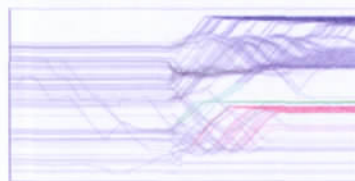
图 2 鹿特丹船舶一天的交通密度图

Crnovrsanin 等^[7]的方法探讨如何在一个抽象的空间中观察可视化运动的轨迹,如图 3 所示,因此时间属性可以被合并入二维平面中的一个维度。这种基于抽象空间对距离可视化的方法能在二维平面上显示时间或其他属性,并在一定程度上保持原有的空间格局。如前所述,时间包含自然循环和重现,每天由 24 h 组成,传统的时钟显示被设计在一个圆形的布局上,因此不少研究者都利用类似的布局来对轨迹的时间属性进行视觉编码。Liu 等^[11]提出了

一个新的使用出租车轨迹数据对路线多样性进行分析的可视化系统,其使用一个具有渐变颜色的圆环来显示一天的 24 h,每度代表了 240 s,圆环上共有 360°代表一天的 24 h。图 4 中,红色代表午夜,绿色是早晨,黄色是中午,橙色是晚上。Kapler 等^[12]开发的 GeoTime 用来表现轨迹的时间和地理信息并能跟踪事件、实体和活动,其采用一种以 x, y 轴表现空间属性,以 z 轴表现时间属性的三维视图设计,如图 5 所示。这种方法既保持了原有的空间信息与地理相关知识,也在展示轨迹路径时加上了时间的信息。



a 随时间变化的轨迹的直接可视化



b 距离抽象可视化

图 3 轨迹的直接可视化与距离抽象可视化对比

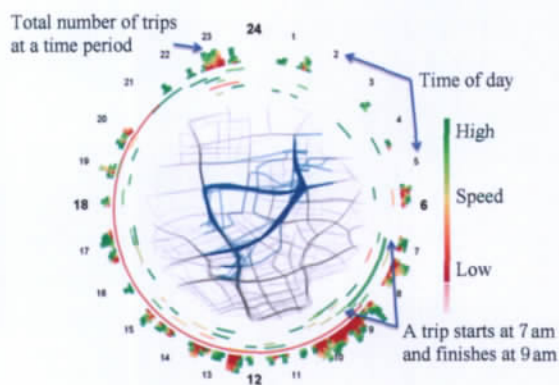


图 4 用类似钟表的布局显示轨迹的时间维度信息

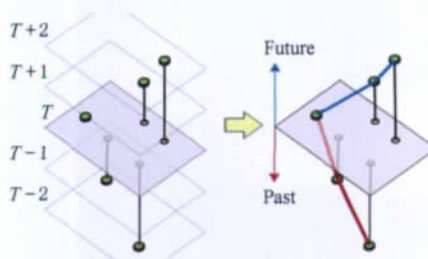


图 5 GeoTime 中的时间线在三维空间的表示

2.3 轨迹其他相关属性的可视化

无论轨迹数据是从哪里或是从哪个应用领域里搜集到的,这些数据都拥有时空属性.除此之外,不同的应用领域搜集到的轨迹数据具有许多不同于时空特征的属性,包括速度、方向、高度等.当数据具有复杂属性(如移动数据中涉及空间、时间、移动实体、数字和定性的特点)时,通常不能很好地被传统的可视化方式充分显示. Eccles 等^[13]用颜色来表现移动速度,如图 6 所示(红色表示快速的移动,而白色正相反代表缓慢的移动),并使用指示标签来注释带有速度可视化的地理时空路径.

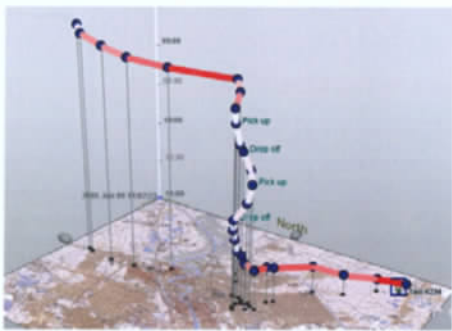


图 6 移动轨迹速度的可视化(色彩)

Hurter 等^[14]对飞机轨迹进行可视化,他们的系统支持多路径显示,并能展示每架飞机轨迹的高度,如图 7 所示,从绿色到蓝色的渐变代表飞机飞行高度(绿色高度最低,蓝色高度最高).在可视化的结果中可以很明显地观察到法国的海岸线,它被浅颜色的轨迹和高空飞行路线(直蓝线)清晰地勾勒出来了. Willems 等^[15]提出了一个地理可视化系统来观察船只动向,以船的速度作为核(kernel)的尺寸来对沿航道移动的船只轨迹作卷积,以显示船只沿路径产生轨迹的密度.大尺寸的核与小尺寸的核结合使用能够同时提供船只运动的概况和细节显示.如图 8 所示,大尺寸的核能够提供使用区域的概况并描绘出了船只的高速航道.个别船只速度变化的细节通过小的核心来显示,以便于突出锚泊区.

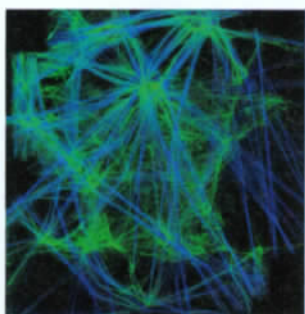


图 7 法国一天航空交通流量纪录的可视化

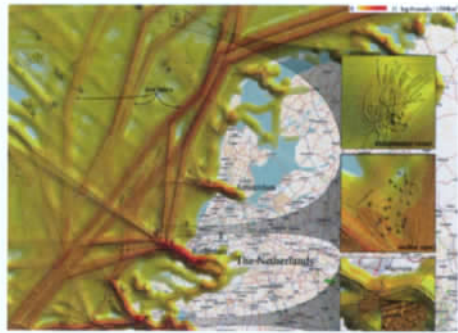


图 8 船舶轨迹中不同密度区域的可视化(光影效果)

2.4 用户交互

可视化技术主要用来显示抽象的数据,用户可能不会知道他们能从数据中得到什么样的规律或者知识.因此交互对数据分析、展示和挖掘特别重要,它允许用户通过对感兴趣的特征进行标记、聚焦等交互操作,在大脑记忆中隐式地对数据中的相关性和存在的关系形成一幅图像. Shneiderman^[16]总结和整理了用户经常进行的重要互动操作,归纳出了概述、放大、滤波、细节需求、关联、历史回溯和提取 7 种经典的用户交互方式.

Hurter 等^[14]提出了一种轨迹的可视化工具 FromDaDy 来表现成千上万的飞机轨迹,用户可以把多个并列的视图组成工作区,通过映射数据属性到 Bertin 的视觉变量来完成可视化相关属性的配置.如图 9 所示,用户可以通过 brush 技术来选择和突出显示数据的一部分;还可以提取选定的数据,将它们从以前的视图中删除,然后放入一个新的显示视图.通过使用如图 10 所示的根据数据流模型设计的可视化配置能很容易地显示出多个属性之间的相互关系,用户可以把轨迹的经度映射到视图的 X 轴上,纬度映射到 Y 轴上;还可以设定线的颜色来表示轨迹数据集的高度场属性.由此生成的可视化结果展示了法国一天的空中交通流量记录,如图 10 b 所示.

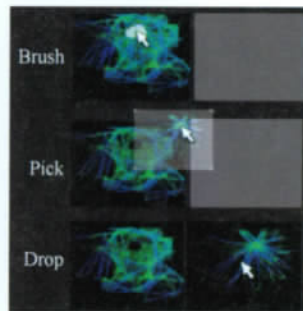


图 9 Pick and drop 交互操作示意

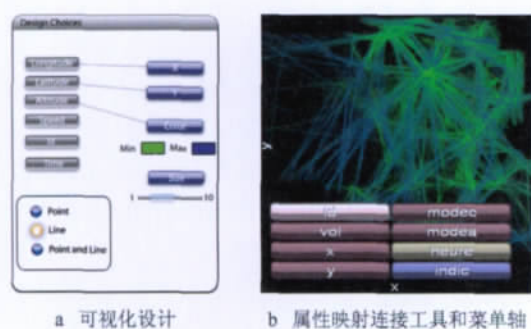


图 10 FromDaDy 系统数据显示与视觉变量连接操作

Liu 等^[11]提出的可视化系统中,交互式的可视化显示严格遵照了文献[16]提到的关于交互的定义.文献[16]中关于缩放、平移、筛选、先概述再细节的想法很容易在该系统中观察到,如图 11 所示.

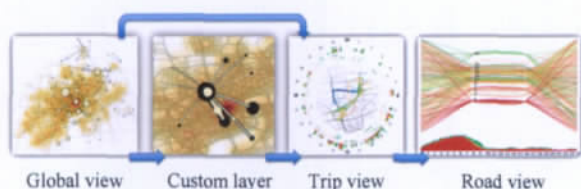


图 11 出租车路线多样性的可视分析流程图

筛选操作可以对轨迹的位置或时间跨度进行选择,用户可以轻松地在全局视图的中央地理圈选择一片区域进行分析;穿过该区域的所有轨迹都被选中,然后速度和时间等属性将会被突出地显示在另

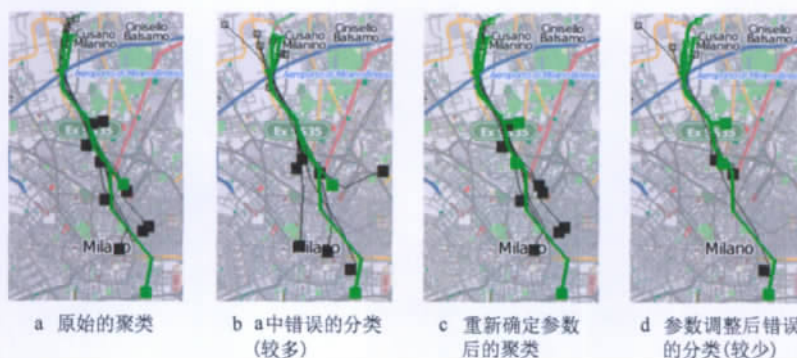


图 12 交互式可视化轨迹分析过程

Andrienko 等^[20]还提出了一个结合交互可视显示,支持人类感知、认知和推理的基本分析框架,其使用一段时间跨度非常长的位置追踪数据来调查各种行动.该框架被用来识别那些涉及到一个人的活动的重要场所,以发现和解释典型的旅行行为(来源、目的地、路线、中途站、目的等特点),并检测不同线路之间的相同地方;说明在何时和为什么选择该次路线.

为从数据中提取出行程,图 13 所示的个人旅行

一个视图里.这种筛选/刷的设计与平移/缩放/概述功能相结合与 Shneiderman^[16]的设计理念相符.

2.5 可视化系统

信息可视化的研究产生了各种各样的移动数据表达方式. Andrienko 等^[17]指出,移动数据可以被视为一个物体、时间与空间位置的函数. Andrienko 等^[18]描述了一个移动数据分析框架,其中结合了交互式可视化显示、认知和推理,数据库操作以及计算方法.文献[17-18]主要集中在大规模的移动数据分析上,并没有对被观察对象的许多参数进行详细分析. Andrienko 等^[19]总结了一些关于可视化运动、变化方面的关键问题和发展的办法,还对移动数据的特征以及如何表现动态、运动和变化的方法进行了讨论,并提出了一个交互式可视化聚类框架,帮助分析人员结合计算方法和可视显示在大规模错综复杂的对象集中发现聚类.该方法是通用的,可以适用于不同类型的复杂对象;进行评估研究后,他们给出了一个该方法在分析移动物体的轨迹中的应用,这种可视分析系统需要人全程参与数据研究分析的互动循环过程.该方法的基本思想是先对分析对象集的一个很小的子对象集采用聚类算法得到预研结果,然后用不同的参数来做实验并分析,最后把剩余的对象一步步并入到第一阶段预研发现的结果中.图 12 所示为一个交互式聚类的例子.

线路被可视化为线条与特殊标记的开始(小型空心方块)和结束(更大的填充正方形)位置,用来帮助分析为什么选择这些行程.该显示允许分析人员检测行程的可能目的地,而对目的地有所了解的分析人员可以使用这种显示检测行程中的哪些地方可能失去了时间记录,分析人员也能查看速度统计或其他计算出的属性.图 13 a 中,红色轮廓标记出仓库的位置.此外,按“共同的起点和终点”或按路线的分组可产生不同的聚类结果,用来帮助推理分析,如图 14 所示.



图 13 个人旅行线路的可视化



图 14 轨迹的 2 种不同聚类可视化方式

轨迹数据具有复杂的结构,无法在一个单一的视图中表示所有的信息.这是因为一个视图的显示不能充分反映复杂数据的所有相关方面,所以需要其他类型的视图补充. Andrienko 等^[21]提出了聚集和汇总、马赛克镶嵌图、移动数据的出发地—目的地数据矩阵等几种可视化分析方法,并制定了一个将不同的技术组合起来进行全面的可视分析研究的框架,如图 15 所示,用户应提供交互措施来支持在不同视图之间建立联系.

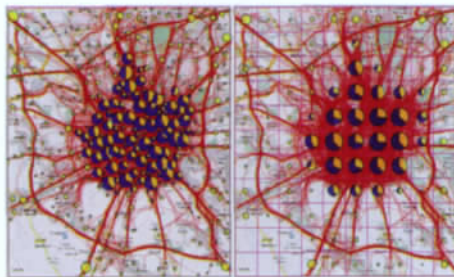


图 15 在汇聚处可视化聚合属性

将总时间和空间划分成等时长间隔和等大小的分割后, Rinzivillo 等^[22]基于“逐步聚类”的思想提出了一种新的视觉分析框架,轨迹刚开始时根据空间距离进行初步聚类,然后应用更先进的距离函数来进一步聚类并结束这个过程,如图 16 所示,右边

的图只显示那些至少含有 15 名成员的聚类.这种方法直接使用对象的时空分布特征来定义距离的概念,根据分析人员感兴趣的不同空间和时空特性制定了一个距离函数库来对轨迹进行比较.属性包括行程的起源、目的地、开始和结束时间、路线(路线的足迹、其空间位置和方向的几何形状特征)和运动的动态变化(例如整个旅程的速度).逐步聚类的想法似乎很简单明了.数据挖掘中存在类似的概念:逐步聚集和子空间聚类.该方法可以分为面向优化的细化修改和结果调整,以及允许用户根据他/她的背景知识来调整聚类的结果两大类.然而,轨迹数据具有异构特性让基于轨迹的问题难以用同样的方法来解决,因此用户可以为每一种属性使用不同的距离函数,以允许分析者逐步对对象集建立一个全面的理解.

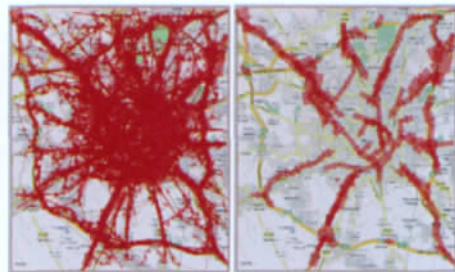


图 16 一个交互过滤集群轨迹的应用

3 移动轨迹可视化案例分析

本节介绍轨迹数据可视化技术在交通管理、流动性分析、导航分析等领域的应用.

3.1 交通管理

Andris 等^[23]以深圳出租车为例,通过研究司机们每天的运营轨迹来分析其经营行为;他们还使用出租车的 GPS 数据、巴士和地铁的智能卡数据搭建了一个关于城市流动性的显示模型^[24];他们的研究揭示了部分出租车司机行为中的一些规律.然而这仅仅是一个开始,还有许多规律尚待发现. Hurter 等^[14]的方法可同时可视化成千上万的飞机轨迹,他们所设计的系统支持多路径显示和查询. Willems 等^[15]利用船的速度和核密度算法来可视化船只的移动轨迹. Girardin 等^[25]提出了一个类似的方法探讨轨迹的多元属性与密度图. Guo 等^[26]提出了 TripVista 来分析一个道路交叉口的交通数据,通过一个精心设计的界面让用户可以从空间、时间和多维视图 3 个角度进行数据分析,如图 17 所示,以便探讨和分析微观交通模式和异常行为;整个系统中集成了轨迹图、改进的主题河(ThemeRiver)和平行坐标(parallel coordinates)等可视化方法.

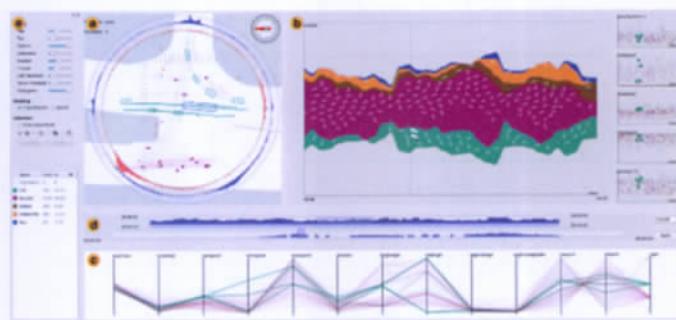


图 17 TripVista 界面

3.2 流动性分析

对于城市设施和服务的规划与科学管理而言,居民日常生活中的需求以及由此产生的流动规律至关重要.已经有一些基于交通轨迹来做城市规划的研究. Liu 等^[24]通过公共汽车和地铁的交通记录以及出租车的轨迹研究了居民的流动规律(图 18),该

系统可通过对这些交通工具带来的流动性进行实时监测,以揭示市民的日常流动模式和演变,以及其中包含的社会经济与土地利用的模式与规律.如图 18 a 所示,地铁流量随时间波动,反映了市民的日常流动性处于摇摆不定的状态.

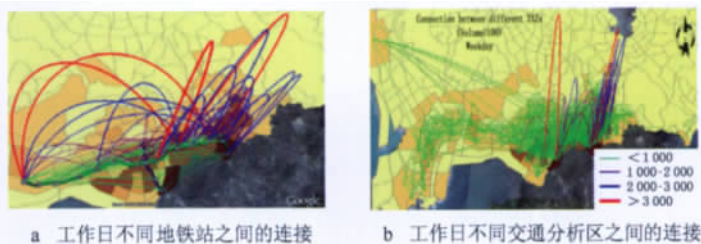


图 18 城市居民公共交通数据的可视化

Girardin 等^[25,27]分析了罗马游客服务器上留下的数据(如游客咨询的数字地图和旅游网站产生的数字记录),提出通过数字痕迹来发现人在一个城市的存在痕迹和运动轨迹.研究人员还展示了如何从数字痕迹中描绘出愿望线,一个愿望线是由大量游客多次参观的足迹所留下的痕迹.例如,可以从按时间顺序排列的具有地理背景参照的照片集中建立一个人在一天的行踪轨迹,这些追踪到的个人的数字

痕迹首先被匿名处理,然后通过聚类,从得到的累积量得出愿望线.图 19 所示为一个游客们对城市感兴趣地点之间的主要路径的地理可视化结果,可以看出,753 名意大利游客(左)积极地去很多人迹罕至的地点访问,不过地点之间的客流量很小;675 名美国游客(左)在梵蒂冈、罗马和罗马圆形竞技场之间形成了一个狭窄的愿望线.

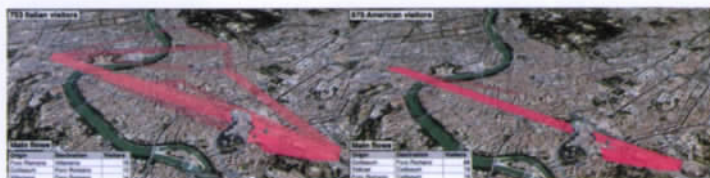


图 19 意大利、美国游客产生的愿望线对比

在另外两篇 2009 年发表的文献^[25,28]中, Girardin 等展示了如何通过移动电话网络的日志来研究游客参观游览一个城市所留下的痕迹.他们注意到本地和非本地注册的移动电话在 2008 年纽约市一个展览期间留下了许多关于附近人群发送和接收信息的记录(如图 20 所示),根据游客游览产生的动态数据

(如电话的数量和分布)以及在不同景点、不同时间拍摄的照片,提出了新的方法来量化公共艺术展对游客分布的影响力以及各种景观的吸引力.

Andris 等^[23]通过 GPS 和 GPRS 轨迹数据分析了几个顶级收入的出租车司机的经营行为(如图 21 所示),通过对选出来分析的司机们每天的行程轨迹



图 20 拍照者在展览附近的流动轨迹

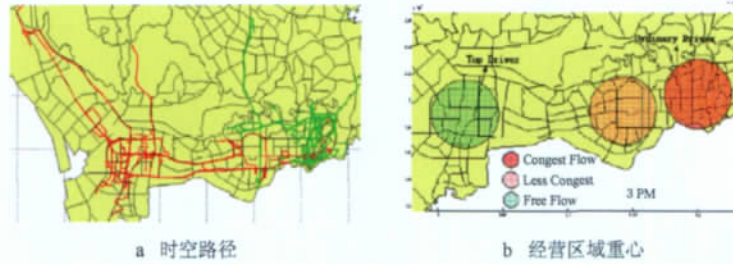


图 21 对日常收入顶尖司机和收入普通司机的比较

和经营区域的时间变化进行可视分析发现,这些司机在特定的时间选择交通条件更好的区域,并仔细规划自己的行车路线,以达到利润最大化.出租车司机的经营行为和技能,可称为“移动智力(mobility intelligence)”.

3.3 导航分析

导航分析是交通管理和城市规划的一个关键问题,它的一个重要应用是驾驶路线建议.目前,基于GPS导航或在线地图导航基本上都有驾驶路线建议的功能.传统上,它只能建议最短路线,但有可能让用户花费的时间更多,因为它不考虑最短距离的路线上的交通状况、道路条件和用户是否熟悉该路线.因此,从实际轨迹数据来分析可能的行驶路线的多样性是极为重要的.微软的T-Drive系统(如图22所示)基于出租车司机的轨迹来推荐用户当前能采取的最快路径^[29],目的是从出租车大量的GPS历

史轨迹挖掘出最高效的驾驶路线,对用户给定的出发时间和目的地,系统可以推荐最快的实用路线.结果表明,文献^[29]的方法可以通过较少的在线计算来找到更快的路线,整个路径的计算不仅基于车辆的历史轨迹数据,还利用了出租车司机比普通司机更有行车经验、对城市道路系统和交通情况更熟悉这一点.在实地评估中证明,超过60%的T-Drive推荐的路径的行车速度都比传统推荐方法的最短路径要快.

在现实世界中,当前往同一目的地时人们可以有多种选择,这称为路线/途径的多样性. Liu等^[11]提出的可视化系统可以根据出租车司机的轨迹来分析路线的多样性. Turner等^[30-31]提出了一种新的空间语法的表示方式,并用它来调查在一组人对可用路径有一定了解的情况下所采取的路线,研究发现,人们并不总是采取最短路径.

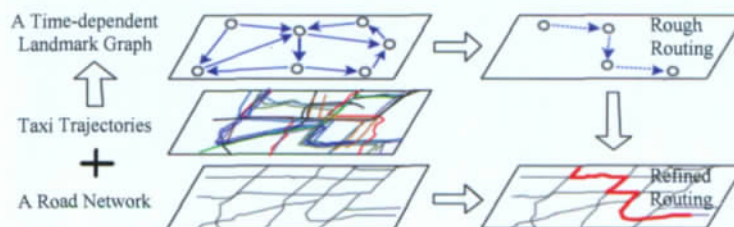


图 22 T-Drive系统的核心概念

4 结论和展望

最近十几年来,轨迹数据的可视化技术得到很

大的发展,涌现出一些有代表性的方法和系统.另外,研究人员也创造性地使用轨迹数据及可视化技术在众多应用领域揭示了车辆和人等的运动规律.本文简要介绍了轨迹数据可视化技术的最新进展和

一些代表性的应用. 因为轨迹数据是高维的时空数据,而且具有数据量大、噪声高等特点,所以轨迹数据的可视分析还存在一些技术上的问题亟待解决,比如如何更好地结合数据挖掘技术和可视化技术来处理海量的轨迹数据,如何表现轨迹数据内在的错误和不确定性,如何更好地表现轨迹数据中更多的属性等. 这个领域仍然处于快速发展之中,我们也期待更高效的技术不断涌现出来.

参考文献 (References):

- [1] Spaccapietra S, Parent C, Damiani M, *et al.* A conceptual view on trajectories [J]. *Data & Knowledge Engineering*, 2008, 65(1): 126-146
- [2] Hägerstrand T. What about people in regional science? [J]. *Papers of the Regional Science Association*, 1970, 24(1): 7-24
- [3] Miller H. A measurement theory for time geography [J]. *Geographical Analysis*, 2005, 37(1): 17-45
- [4] Miller H. Modeling accessibility using space-time prism concepts within geographical information systems [J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 1991, 5(3): 287-301
- [5] Andrienko N, Andrienko G, Pelekis N, *et al.* Geography mobility and privacy a knowledge discovery vision [M]. Heidelberg: Springer, 2008: 15-38
- [6] Quddus M, Ochieng W, Noland R. Current map-matching algorithms for transport applications: state-of-the art and future research directions [J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2007, 15(5): 312-328
- [7] Crnovrsanin T, Muelder C, Correa C, *et al.* Proximity-based visualization of movement trace data [C] // *Proceedings of IEEE Symposium on Visual Analytics Science and Technology*. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 2009: 11-18
- [8] Andrienko N, Andrienko G, Gatalsky P. Supporting visual exploration of object movement [C] // *Proceedings of the Working Conference on Advanced Visual Interfaces*. New York: ACM Press, 2000: 217-220
- [9] Andrienko N, Andrienko G, Gatalsky P. Exploring geovisualization [M]. Amsterdam: Elsevier, 2005: 201-222
- [10] Willems N, Van De Wetering H, Van Wijk J. Evaluation of the visibility of vessel movement features in trajectory visualizations [J]. *Computer Graphics Forum*, 2011, 30(3): 801-810
- [11] Liu H, Gao Y, Lu L, *et al.* Visual analysis of route diversity [C] // *Proceedings of IEEE Conference on Visual Analytics Science and Technology*. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 2011: 171-180
- [12] Kapler T, Wright W. GeoTime information visualization [J]. *Information Visualization*, 2005, 4(2): 136-146
- [13] Eccles R, Kapler T, Harper R, *et al.* Stories in GeoTime [C] // *Proceedings of IEEE Symposium on Visual Analytics Science and Technology*. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 2007: 19-26
- [14] Hurter C, Tissoires B, Conversy S. FromDaDy: spreading aircraft trajectories across views to support iterative queries [J]. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 2009, 15(6): 1017-1024
- [15] Willems N, Van De Wetering H, Van Wijk J. Visualization of vessel movements [J]. *Computer Graphics Forum*, 2009, 28(3): 959-966
- [16] Shneiderman B. The eyes have it: a task by data type taxonomy for information visualizations [C] // *Proceedings of IEEE Symposium on Visual Languages*. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 1996: 336-343
- [17] Andrienko N, Andrienko G. Designing visual analytics methods for massive collection of movement data [J]. *Cartographica The International Journal for Geographic Information and Geovisualization*, 2007, 42(2): 117-138
- [18] Andrienko G, Andrienko N, Hurter C, *et al.* From movement tracks through events to places: extracting and characterizing significant places from mobility data [C] // *Proceedings of IEEE Conference on Visual Analytics Science and Technology*. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 2011: 159-168
- [19] Andrienko G, Andrienko N, Rinzivillo S, *et al.* Interactive visual clustering of large collections of trajectories [C] // *Proceedings of IEEE Symposium on Visual Analytics Science and Technology*. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 2009: 3-10
- [20] Andrienko G, Andrienko N, Wrobel S. Visual analytics tools for analysis of movement data [J]. *ACM SIGKDD Explorations Newsletter*, 2007, 9(2): 38-46
- [21] Andrienko G, Andrienko N. Visual analytics for geographic analysis, exemplified for different types of movement data [C] // *Proceedings of Information Fusion and Geographic Information System (IF & GIS)*. Heidelberg: Springer, 2009: 3-17
- [22] Rinzivillo S, Pedreshi D, Nanni M, *et al.* Visually driven analysis of movement data by progressive clustering [J]. *Information Visualization*, 2008, 7(3/4): 225-239
- [23] Andris C, Ratti C, Liu L, *et al.* Uncovering taxi driver's mobility intelligence through his trace [J]. *Area*, 2009(2006): 1-17
- [24] Liu L, Biderman A, Ratti C. Urban mobility landscape: real time monitoring of urban mobility patterns [C] // *Proceedings of the 11th International Conference on Computers in Urban Planning and Urban Management*. Amsterdam: Elsevier, 2009: 1-16
- [25] Girardin F, Vaccari A, Gerber A, *et al.* Quantifying urban attractiveness from the distribution and density of digital footprints [J]. *International Journal of Spatial Data Infrastructure Research*, 2009, 4: 175-200

- [26] Guo H, Wang Z. TripVista: triple perspective visual trajectory analytics and its application on microscopic traffic data at a road intersection [C] //Proceedings of Pacific Visualization Symposium. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 2011: 163-170
- [27] Girardin F, Calabrese F, Dal Fiore F, *et al.* Digital footprinting: uncovering tourists with user-generated content [J]. *IEEE Pervasive Computing*, 2008, 7(4): 36-43
- [28] Girardin F, Vaccari A, Gerber A, *et al.* Towards estimating the presence of visitors from the aggregate mobile phone network activity they generate [C] //Proceedings of the 11th International Conference on Computers in Urban Planning and Urban Management. Amsterdam:Elsevier, 2009: 1-11
- [29] Jing Y, Yu Z, Chengyang Z, *et al.* T-drive: driving directions based on taxi trajectories [C] //Proceedings of the 18th SIGSPATIAL International Conference on Advances in Geographic Information Systems. New York: ACM Press, 2010: 99-108
- [30] Turner A. From axial to road-centre lines: a new representation for space syntax and a new model of route choice for transport network analysis [J]. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 2007, 34(3): 539-555
- [31] Turner A. The role of angularity in route choice an analysis of motorcycle courier GPS traces [M] //Lecture Notes in Computer Science. Heidelberg: Springer, 2009, 5756: 489-504