

空间计算*

作者: 沙希·谢卡尔(Shashi Shekhar)
史蒂文·费纳(Steven K. Feiner)
瓦利德·阿列夫(Walid G. Aref)

译者: 周 檬 乐 阳

关键词: 空间计算

主要观点

- 由 GPS 技术普及所开启的空间计算通过各类基于位置的服务 (Location-based Service, LBS) 极大地丰富了我们的生活。
- 空间计算通过空间数据库、空间统计以及空间数据挖掘的理论与方法, 推进了计算机科学的发展。
- 空间计算未来潜在的变革性机遇包括通过普适环境下的室内基于位置的服务、位置感知的物联网、持续性全球监控、可视化技术、预测以及预警警报等技术手段应对社会性的挑战问题, 如气候变化、食品、能源及水资源的合理分配等。

空间计算包含改变我们对位置认知的理念、解决方案、工具、技术以及系统, 即改变我们如何认识、表达我们与位置的关系, 并将其可视化, 以及我们如何在其中进行导航的方式, 从而改变我们的生活。无处不在的 GPS 技术使国家公园里的背包客、湖面上的划船者、来到新地方的孩子、出租车 (或者优步司机、自驾司机) 和无人机可以知道他们自己的位置、附近的设施和到达感兴趣的目的地路径¹。

大型组织将空间计算用于定位选址、资产跟踪、设施管理、导航以及物流等各方面。科学家们利用

全球导航卫星系统² (例如 GPS)^[24] 追踪濒危物种, 更好地理解动物的行为。农民们通过这些技术支持精准农业从而提高作物产量并降低成本。虚拟地球 (virtual globe) 技术^[14] 以一种引人入胜并且互动的方式帮助学校的孩子们了解他们身边的环境以及广袤的世界。在近期的自然灾害当中, 谷歌地球 (Google Earth) 使许多人能够获取影像信息从而在救灾以及灾后重建的工作中提供帮助^[26]。在 2010 年海地地震的几天之内, 灾后道路图就已经根据志愿者上传的当地实时信息, 由很受欢迎的志愿者地理信息^[13]

* 本文译自 *Communications of The ACM*, “Spatial Computing”, 2016, 59(1):72~81 一文。

¹ 计算社区联盟 (Computing Community Consortium) 2012 年研讨会的成员们使用 “空间计算” 这一术语用于概括空间数据结构^[46]、空间数据库^[50]、空间数据挖掘^[10]、空间统计^[12]、空间认知^[8]以及其他与地理或者非地理空间相关的计算性问题。

² GNSS, Global Navigation Satellite System。

网站 OpenStreetMap^[44] 绘制出来了。

在未来 10 年里, 空间计算技术将会带来一系列革命性变革。例如, 目前的路径选择主要基于最短距离或者最短时间原则, 而有的公司已经在对“环保路径选择”(eco-routing) 进行实验。这种路径选择旨在使燃料消耗以及温室气体排放最小化。一种规避左拐的智能路径选择方法使快递公司 UPS 每年减少超过 300 万加仑的燃料消耗^[20]。当环保路径选择服务能够向消费者和包括公共交通在内的车队提供的时候, 这类能源上的节省将会得到数倍的增长。

手机的普及为获取整个世界以及居住在其中的人类的各方面信息提供了新的机遇^[17]。研究表明, 用户每日携带的手机中的内嵌移动传感器有可能使我们能够在地震发生后的数秒内探测到地震^[11]。导航公司(例如 Waze, <https://www.waze.com/>) 越来越多地使用手机记录对繁忙公路上的交通流量进行估计。为了更好地理解作为一个复杂系统的地球, 对创建数字化基础设施的需求与日俱增。技术上的进步极大地推动了在现场或实验室中进行的数据采集和对地球系统的模拟。这促使地球科学数据出现指数级增长, 我们适应地球系统模型中多种现象的能力也大幅提高。这种进步也许对于理解我们不断变化的地球以及它的物理特征(例如海洋、大气和陆地上的特征)、生物特性(如植物、动物以及生态系统)以及社会属性(比如气候变化^[19]), 可持续发展, 理解食品、能源和水系统之间的交互^[36], 车联网和自动驾驶汽车^[11]) 都至关重要。

空间计算领域的工作, 在近几十年开展得十分广泛, 很难在一篇文章中以足够的深度和广度覆盖这一涉及多学科的空间计算领域所有的工作。本文的目的有两个方面: 基于计算社区联盟 2012 年研讨会(<http://cra.org/ccc/events/spatial-computing-workshop/>) 上的讨论, 分享对空间计算的广泛见解, 以及对更广义的计算领域群体在这一跨学科领域所扮演的角色展开更广泛的讨论。为此, 我们将会尽可能全面而又不失主次地介绍研讨会中的若干实例。更多的实例将在附录以及谢卡尔等的文章^[52] 中提及。

革命性的成就

最初, 空间计算的目标是对地图以及其他地理数据的计算表达和分析提供支持。它的影响力主要集中在高度专业化领域中(具有代表性的专业组织如表 1 所示)。自此以后, 一些具有革命性意义的空间计算技术就被深入地集成到了社会中, 并帮助回答了人类经常问的许多问题。若想对空间计算进行进一步的探究, 请参考多种教材^[3,5,6,47,50]、专著^[45,48]、百科全书^[16,53] 以及学术期刊^[4]。

表1 代表性空间计算组织

ACM空间信息分会(ACM SIGSPATIAL)
国际摄影测量与遥感学会 (International Society of Photogrammetry and Remote Sensing)
国际地理联合会(International Geographical Union)
IEEE地球科学与遥感学会 (IEEE Geoscience and Remote Sensing Society)
美国导航学会(Institute of Navigation)
摄影光学仪器工程师学会 (Society of Photo-optics Instrumentation Engineers)

全球定位系统 “我在地球表面上的哪个位置?” 18 世纪时, “经度问题” 是科学界最具挑战的问题之一^[55]。由于缺乏测量经度的能力, 地理大发现时代的水手们一旦失去陆地作为视觉参考便会立刻在海洋中迷失方向。最终, 在指南针、地图、星图以及精密计时仪(一种在移动船只上工作的时钟) 的帮助下, 即便身处没有地标参考的大海中, 也有可能以某种精度进行定位。随着 1978 年 GPS 卫星的发射以及随后的民用化, 我们现在可以在地球表面任何位置进行快速、准确的自我定位。GPS 是基于空间的全球导航卫星系统^[24,27] 之一, 这种系统为位于地球上任意地点的终端用户提供位置和时间信息(只要该位置能无阻挡地“看”到星座中几十颗卫星中 4 颗以上的卫星)。基于全球导航卫星系统的精确授时深入到日常生活; 推动了地理分布传感网格的发展以实现对运动目标的监测; 也渗透到输变电网络。这种定位功能还支撑了一系列面向终端用户的基于位置的服务(如逐向导航³、近邻

搜索以及地理编码服务)。全球导航卫星系统及相关基于位置的服务现在已广泛部署,对商业活动、科学研究、跟踪及侦查助益甚大,这得益于其利用

超大规模集成电路(VLSI)中的低成本实现,使GPS非常容易集成在手机或者平板设备中。

遥感技术^[3] “哪部分大陆表面是由植被覆盖的?近几十年的气候变化、城市化进程以及人口增长使森林覆盖率发生了怎样的变化?”传统上,这些问题主要通过人工实地调查来得到答案,而这类调查往往耗费人力物力,故而通常被限制在小范围中进行。现代遥感卫星使全球范围的持续地表变化监测变为可能^[31]。另外,特制仪器可以探测表面以下资源。由于涉及的数据体量巨大,计算技术在存储、查询及分析遥感数据集中的作用非常关键。这些数据集也催生了诸如谷歌地球引擎(Google Earth Engines)的计算革新^[43]。

地理信息系统 “朝鲜的导弹能够打到哪些国家?”图1是一个著名的将球面距离用于平面地图而得到错误的距离信息的例子,没有地理信息系统支持的球面测量,这种错误很容易发生。地理信息系统支持许多主流地理数据生产商使用的地图投影,并可以为多源数据的融合提供帮助。地球并不是一个标准的球体,而地理信息系统能够对地球进行更精确的表达,包括椭球体表达以及基于地表大地测量基准点进行定位的非参数化表达。地理信息系统获取、存储、分析、管理并以可视化技术展示空间数据^[22,53],比如,一张地球的地图就是一个曲面在平面上的表达。尽管地图投影很大程度上保留了拓扑特征,但对于度量特征的保持则依赖于所使用的投影方法。地理信息系统具有一系列特有的能力。在下两节我们会进一步说明,地理信息系统还能够通过基于几何的表连接对空间查询和统计分析提供支持。地理信息系统极大受益于计算技术的进步和数据结构。

空间数据库管理系统 “在斯隆数字巡天计划⁴中找到相互之间距离30角秒内星系对。”“哪

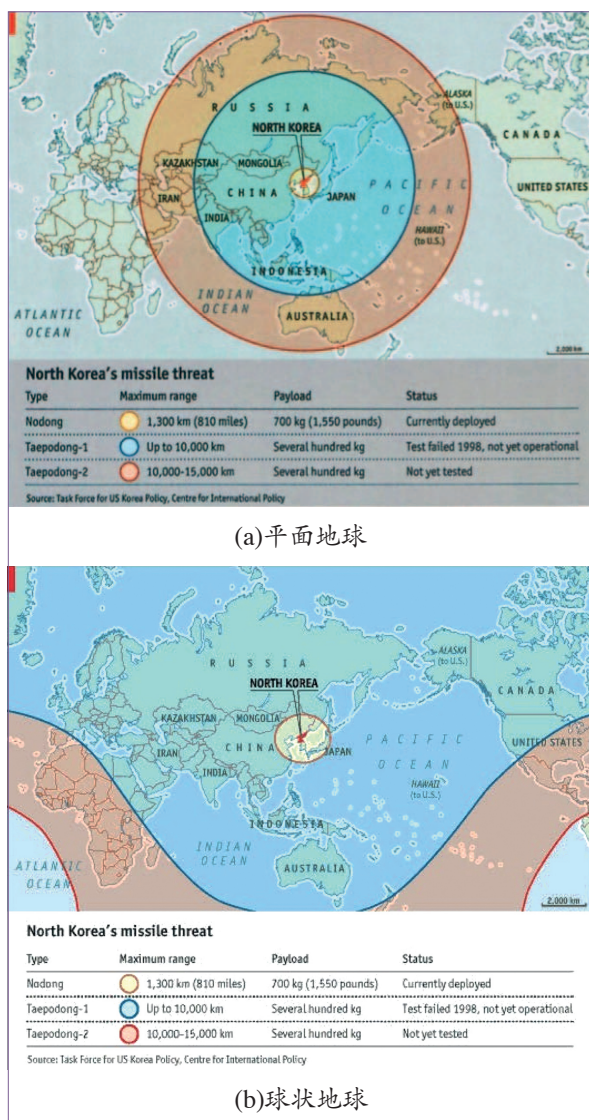


图1 地理信息系统。《经济学家》杂志在2003年的一篇文章中极大地低估了朝鲜导弹的射程,因为其用到的地图(a)没有考虑地球的球状形状;(b)图为正确版本

³ Turn-by-turn navigation, 汽车导航就是采取这种方式。

⁴ 斯隆数字巡天计划(Sloan Digital Sky Survey), 是使用位于新墨西哥州阿帕契天文台的2.5米口径望远镜进行的红移巡天项目。该项目开始于2000年,以阿尔弗雷德·斯隆的名字命名,计划观测25%的天空,获取超过100万个天体的多色测光资料 and 光谱数据。斯隆数字化巡天第三期工程已经于2008年7月启动,持续至2014年。



图2 对伦敦1854年水泵位置与霍乱死亡案例关系的分析^[54]和空间统计测试结果

些房屋最容易受全球变暖引发的海平面上升、暴雨或者春季化雪影响而遭到水淹？”在空间数据库发

展之前，这类空间查询依赖于大量的编程，并且由于二维空间数据和一维数据类型之间的不匹配以及传统数据库系统所使用的索引，需要很长的计算时间。另外，简单的空间数据类型集合不足以支撑多级查询，因为一些查询的结果无法由点、线或面直接表示。空间数据库^[50]引入了空间数据类型、操作、空间数据结构以及算法用来表达及有效执行多级并发空间查询。

空间统计 “硅晶片上的哪些区域有异常高度集中的缺陷？”“是否有疾病的爆发？发生在哪儿？”1854年，约翰·斯诺(John Snow)医生手工绘制了标有霍乱病例位置的伦敦街道图，以可视的形式标识出了布罗德街(Broad Street)水泵附近的疾病爆发热点区域(见图2a)。在当时，即使对于小范围内单一疾病的分析工作也需要几天时间来完成。今天，公共卫生机构监测传染性疾病在非常大范围内的传播，所借助的手段便是空间统计测试(图2b)。这种方法可用来探测疾病的爆发和热点以及将这类事件与自然的数据波动加以区分。空间统计技术在公共安全、超大规模集成电路设计、天气预报、交通、采矿业、公共卫生以及农业等领域中也有着广泛的应用。空间统计理论可以应对将传统统计模型用于地理数据的过程中出现的特有挑战。尽管空间统计技术比传统统计方法在计算量和数据量上都高出一个数量级，但近几十年发展起来的价格低廉的高性能计算与数据技术已经使空间统计方法得到了更多的青睐和更广泛的应用^[12]。

新的变革

20 世纪后半叶，大多数地图是由政府机构或者

表2 空间计算领域的变化

20世纪后半叶	21世纪以及将来
专业组织(例如美国国防部和油气勘探公司)使用地理信息系统(Geographic Information System, GIS)技术	数十亿人使用基于位置的服务并更新地图
政府机构和测绘公司中训练有素的人生产地图	数十亿人成为地图制作者，许多现象被观察到
只有专业软件(例如ArcGIS和Oracle Spatial)有能力编辑或分析地理信息	越来越多的平台可以感知位置
用户期望不大(例如辅助生产分发纸质地图以及电子地图)	由于巨大的潜力与挑战，用户期望正快速增长

测绘公司中的少数专业人员生产的。专业组织使用专业软件来编辑与分析地理信息。近年来空间计算技术的进步极大地改变了这一局面（见表2）。联网的手机用户数以亿计，几乎全球都在使用空间技术。正是这些技术的成功使得用户对于空间计算的期望愈发强烈。同时，用户也越来越担忧可能存在的滥用位置数据的问题。

数十亿人使用基于位置的服务并参与更新真实地图 基于Web技术、手机、智能手表、商用GPS设备以及基于位置的社交媒体的普及促进了基于位置的服务的广泛应用^[48]，而互联网服务将GIS技术推向大众。借助手机和商用GPS设备，数十亿人正使用相关的服务。同样，世界范围内超过十亿人也正使用优步、Waze、谷歌地图（Google Maps）、脸谱签到（Facebook Check-in）以及其他基于位置的社交媒体。

数十亿人作为地图制作者，许多现象变得可观测 越来越多的手机用户成为空间数据的来源，这些用户可以主动甚至被动地提供他们的地理信息。其直接效果是可以提供各种空间数据的“测量员”遍布四处、越来越多。更多的现象也变得可观测，因为面向三维制图的传感器正变得越发丰富，可以在更宽的频谱以更高的分辨率捕捉信息。

多级位置感知平台 从传统上来说，空间计算的支持主要集中在应用软件层（如ArcGIS）、Web服务（如Google Maps和MapQuest）以及数据库管理（如SQL3/OGIS）。在过去十年间，空间计算支持正向计算堆栈中更多的层面展开，包括HTML5、社交媒体签到、IPv6以及开放位置服务。

源于巨大潜能与风险的不断升高的期望 基于位置的服务、导航辅助和交互式地图可以说已经超出了用户的期望。直观性和易用性已经让它们赢得了良好的声誉。然而，空间计算技术的成功也让用户提高了警惕。关于空间隐私的担忧必须得到妥当的处理，以免惊扰平民、泄露经济组织的信息或者损害公信力。

近期机遇

这里概括介绍的空间计算上的深远变化反映了新兴研究方向并指出了若干令人兴奋的新机遇。

增强现实系统 增强现实技术通过实时叠加空间配准的媒体内容，丰富了我们对于现实世界的感知。这项技术已经被运用于飞机驾驶舱内的平视显示器上，并成为智能手机应用中的流行功能。随着轻便而功能强大的计算机驱动眼镜的普及，增强现实技术将在医疗、农业、旅游、商业、工程、建筑及城市规划、装配保养以及日常的智能扩展等领域中扮演核心的角色。在这些应用中，空间计算面对的新挑战来源于对新算法、用户与云端的合作、人与设备全三维定位定向估计以及实体与虚拟物体配准的需求。例如：何种人性化界面可利用所有的人体感官以及人体器官控制实现与增强现实在多级任务中的交互？在技术上如何在所有自由度上捕捉人体信号并将其展示在虚拟空间中？

空间预测分析 过去十年中，空间统计^[45]和空间数据挖掘^[51]领域技术的进步有可能使我们提高在飓风路径预测、传染病扩散和交通拥堵等应用中的预测精度和时效。由于空间自相关、非平稳性和边缘效应等挑战，经典预测方法遇到了困难^[32,35]。空间模型在对一系列问题进行时空预测方面有着极其宝贵的价值。这个研究领域需要回答的问题包括：机器学习方法^[30]如何泛化以解决自相关、非平稳、异质和多尺度带来的挑战？在存在事务诱发的扭曲的情况下如何对时空频繁模式进行挖掘？哪些可扩展、数值健壮的方法可以在基于最大似然参数估计方法的空间自相关建模场景下进行稀疏（但非带状）矩阵行列式的计算？

空间协作系统、队伍和群体 空间计算技术将互联网从网络空间向位置感知的物联网扩展，实现静止构造物与移动物体间的互联，帮助协调各类目标的运动，掌握城市内外的流动模式。驾驶员、智能汽车和基础设施在未来能够协同合作以减少交通堵塞、加快疏散以及提高安全性。这种合作在使用一组空间对象进行计算与决策过程中也会带来

“信任”上的挑战。这些地理分布对象（例如智能信号灯和车辆）如何在存在 GPS 干扰欺骗的情况下也以可信的方式进行合作？

将空间计算扩展到室内、水下和地下空间 尽管 GPS 在世界范围内已经普及，但其信号在室内多数情况下是无法获取的，而人类平均有 80% 至 90% 的时间在室内度过^[56]。而 21 世纪的新期望则是，借助新出现的技术，如室内定位、路径规划和导航，在基于手机信号塔、Wi-Fi 信号发射器和其他室内设施的帮助下，室内和地下定位技术使我们在任何时候都能感知空间信息。室内定位带来了若干新的研究问题，包括：哪种可扩展算法能够从电脑辅助设计 (CAD) 图纸中生成室内空间可导航地图？对于没有可用的 CAD 图纸的建筑又该如何处理？我们如何在 GPS 信号微弱甚至缺失的室内空间获得可靠的定位？

长远研究需求

空间计算为社会做出了巨大贡献，然而这些成功也带来了巨大的挑战。应对这些挑战着实需要空间计算领域之外的专家与专业知识。首先，为应对大众作为实际地图的生产者以及多数现象变得可观测这一挑战，需要从曾经仅靠少数受信赖的来源中获取并融合数据的方式转换为从广大志愿者中采集数据并得到数据来形成合力。第二，在应对多平台配备位置感知设备这一过程带来的挑战时，空间计算技术将从少数平台（如手机）扩展至几乎所有平台。第三，为了保证社会所有成员能够从基于位置的服务中得到便利，需要我们更深刻地理解人类的认知。最后，空间计算必须应对用户在隐私方面的担忧与信任问题。

从融合到协同 过去，流行的 GIS 软件产品主要针对几何数据（如点线面）和栅格数据（如卫星影像）。然而，志愿者用户所提供的签到、推特、

地理标签、沙希迪平台⁵上的带地理位置的报告以及上传的 GPS 轨迹将会越来越多地成为地理数据的来源。志愿者地理信息在数据误差、可信度以及有偏性等方面带来了挑战。而由于空间计算技术中的错误所导致的政策和法律方面的后果可能会很严重。例如，在 2005 年卡特里娜飓风后，由于新奥尔良地区洪泛区联邦级地图公布延迟，导致重建工作缓慢和不确定性增加，这引起了美国国会极大的关注^[15]。这类政治或法律上的并发问题在未来可能会更加严重。应对这些挑战需要从传统的数据融合向数据协同这一更广泛的范式转变，然而这也会带来更多的问題。

从传感器到云端 在 20 世纪，空间计算的公众形象由软件代表。今天，空间系统计算堆栈中的所有层面受到越来越多的位置感知平台的影响，而这些平台大多得益于智能手机和基于 Web 的虚拟地球的普及。我们需要新的基础设施来支持空间计算在计算堆栈低层次上的实现，从而让空间数据类型与操作能够在硬件、汇编语言、操作系统内核、运行系统、网络堆栈、数据库管理系统、地理信息系统以及应用程序之间得到合理的分配。我们也需要增强现实技术去适应如眼镜式显示器和智能手机在内的设备，以便自动、准确和可扩展地提取、识别和表达信息。在传感方面的要求包括为应急响应的实时厘米级定位、健保管理、水资源和能源分布的实时事态感知等提供无处不在的基础设施。空间大数据所带来的计算性问题^[5]为云计算研究带来新的机遇：为那些体量、多样性和更新速率超出了寻常规模的空间数据集找到能在合理开销下进行学习、管理和处理的解决方案。

重视空间认知 空间计算服务在过去仅仅针对少数经过训练的 GIS 专业人员，他们使用专门的普通公众难以理解的技术语言。随着每天使用基于位置服务的民众自己成为了制图者，在今天理解空间认知的心理学层面的特性就变得十分紧迫而重要

⁵ 沙希迪平台(Ushahidi)，是一个非盈利性软件公司。该公司旨在开发免费、开源的信息采集、可视化及交互式制图软件。“Ushahidi”一词在斯瓦西里语当中有“见证”或“目睹”的意思。

了。这种理解能够提升社会大众对地图和其他地理信息产品使用和设计的效果与质量。未来空间认知辅助方面的研究需要探索新方法与新思想,比如为无法阅读地图的人群或者在没有名称的新空间内部进行基于地标的路径选择。理解群体在参与性规划中或者智能“快闪族”在协调位置移动时的行为,能加强空间计算对群体的服务而不仅仅是个人。面向突发事件(如飓风)应急警告的推特解译需要将语境带入到情景中以便提供更多新机会。为了更好地利用这些机遇,需要新的方法来了解我们的空间能力以及不同群体思考空间的方式。

地理隐私 尽管位置信息对应急响应人员、消费者和产业界极为有用并产生了巨大的价值,但这些数据流也带来了严重的隐私和可信度问题。这些问题往往和使用地理定位或者地理监控来监视普通群众相关,这种现象有时被称为跟踪、地理奴役(geo-slavery)^[7]或地理隐私问题^[18,34,41,42]。在实用性和隐私保护之间找到平衡仍然是一个挑战。迄今为止,计算机科学家在使位置信息模糊化方面的工作产生的效果多是负面的。因为担心他们的位置、轨迹和其他时空个人信息的隐私泄露,许多人对使用移动商务产生了疑虑^[18]。计算机科学家需要与决策者以及其他支持者一同努力来建立消费者的信心。我们需要建立与“公平信息惯例”^[42]相符的新的法律原则,特别是那些关于告知、透明、经过允许、诚信及责任与后果明确的原则。

结论

空间计算将在未来数十年内为研究者和创业者提供大量的机遇。成功利用这些潜在的机遇意味着需要大量的智力投资以及相关资金支持,用于包括但不限于本文列举的这些主题在内的空间计算领域课题的研究。当今的许多空间计算项目太过局限而无法推动本领域取得关键进展。资助者应当考虑支持更大规模的、富有冒险精神的、由多个院校不同研究小组参与的研究项目。涉及美国国家地理信息与分析中心、加拿大地理信息知情决策网络、荷兰

的RGE以及澳大利亚的空间信息合作研究中心的一些计划是很好的范例。另一个阻碍此领域发展的在于基金申请书往往由没有空间计算专家参与的专家组审议,这时常导致审议结果中缺乏表现突出的佼佼者。因此,资助机构应当考虑为这些项目书提供特别的评审专家组并提出专门的要求。

若干机构制定了空间计算领域的研究计划^[23,25,26,28,29],包括美国国家癌症研究所的“空间不确定性:数据、建模和交流”项目、美国国家地理空间情报局的“学术研究项目”以及由欧盟资助的ChoroChronos工程^[49]。考虑到其跨学科特性,资助者应当通过设立专门针对空间计算持久性的研究项目,构建计算机科学在这一新兴领域的领导地位。机构间的合作能够减少项目竞争并促进跨学科、跨机构研究,从而使整个领域以及合作机构本身受益。

最后,空间计算科学家需要从他们所在的机构得到本单位更多的经常性支持。除大型的一次性项目资金外,一些研究型大学建立了GIS中心(类似于20世纪60年代的计算机中心),并发起了校园范围的空间计算项目(例如加州大学圣达芭芭拉分校的空间学习中心, <http://spatial.ucsb.edu/>,以及明尼苏达大学的U-Spatial项目)。这些项目为包括气候变化和公共卫生在内的一系列学科的研究工作提供服务。更多的研究型大学应当跟随此步伐。

空间计算已经证明其对社会是一个重要的经济机会,而未来对空间计算研究的支持将会带来更多革命性的技术进步。■

致谢:

感谢计算社区联盟2012年空间计算研讨会的所有与会人员,以及美国国家科学基金会的支持。特别感谢组委会成员(人名略)。感谢计算社区联盟成员给予的宝贵意见和指导。感谢明尼苏达大学的研究人员对2020年空间计算研讨会活动组织上的帮助。同样感谢第12届时空数据库国际研讨会“愿景与挑战”板块^[40]的投稿作者们。本文作者的研究得到了美国国家科学基金会、美国国防部以及明尼苏达大学的项目支持。

作者:

沙希·谢卡尔(Shashi Shekhar): 美国明尼苏达大学计算机科学系麦克奈特计划校特聘教授、计算社区联盟委员会前成员。shekhar@cs.umn.edu

史蒂文·费纳(Steven K. Feiner): 美国哥伦比亚大学计算机图形学 and 用户界面实验室主任, 计算机科学教授。feiner@cs.columbia.edu

瓦利德·阿列夫(Walid G. Aref): 美国普渡大学计算机科学教授。ACM SIGSPATIAL前主席。aref@cs.purdue.edu

译者:



周 檬

香港浸会大学深圳大学联合培养博士生。主要研究方向为时空数据挖掘。zhoumeng@life.hkbu.edu.hk



乐 阳

CCF高级会员。深圳大学副教授。主要研究方向为时空数据分析与挖掘、交通地理信息系统。yueyang@szu.edu.cn

(本期译文责任编辑: 卜佳俊)

参考文献

- [1] Ali, R.Y., Gunturi, V.M., Shekhar, S., Eldawy, A., Mokbel, M.F., Kotz, A.J., and Northrop, W.F. Future connected vehicles: Challenges and opportunities for spatiotemporal computing. In *Proceedings of the 23rd ACM SIGSPATIAL International Conference on Advances in Geographic Information Systems* (Seattle, WA, Nov. 3~6). ACM Press, New York, 2015.
- [2] Auchincloss, A.H., Gebreab, S.Y., Mair, C., and Roux, A.V.D. A review of spatial methods in epidemiology, 2000~2010. *Annual Review of Public Health* 33 (2012), 107.
- [3] Campbell, J.B. and Wynne, R.H. *Introduction to Remote Sensing*, Fifth Edition. The Guilford Press, New York, 2011.
- [4] Caron, C., Roche, S., Goyer, D., and Jaton, A. GIScience journals ranking and evaluation: An international Delphi study. *Transactions in GIS* 12, 3 (2008), 293~321.
- [5] De Berg, M., Van Kreveld, M., Overmars, M., and

Schwarzkopf, O. *Computational Geometry*. Springer, Berlin Heidelberg, Germany, 1997.

- [6] Devillers, R., Jeansoulin, R., and Goodchild, M.F. *Fundamentals of Spatial Data Quality* (Geographical Information Systems Series). Wiley-ISTE, New York, 2006.
- [7] Dobson, J. and Fisher, P. Geoslavery. *Technology and Society Magazine* 22, 1 (Spring 2003), 47~52.
- [8] Downs, R.M., Stea, D., and Boulding, K.E. *Image and Environment: Cognitive Mapping and Spatial Behavior*. Aldine Transaction, a division of Transaction Publishers, New Brunswick, NJ, and London, U.K., 2005.
- [9] Esri. *Understanding Geodesic Buffering*; <http://www.esri.com/news/arcuser/0111/geodesic.html>.
- [10] Ester, M., Kriegel, H.-P. and Sander, J. Spatial data mining: A database approach. In *Advances in Spatial Databases, Volume 1262 of Lecture Notes in Computer Science*. Springer, Berlin, Heidelberg, Germany, 1997, 47~66.
- [11] Faulkner, M., Olson, M., Chandy, R., Krause, J., Chandy, K., and Krause, A. The next big one: Detecting earthquakes and other rare events from community-based sensors. In *Proceedings of the 10th International Conference on Information Processing in Sensor Networks* (Chicago, IL, Apr. 12~14). IEEE Computer Society, Washington, D.C., 2011, 13~24.
- [12] Gelfand, A.E., Diggle, P., Guttorp, P., and Fuentes, M. *Handbook of Spatial Statistics. Chapman and Hall/CRC Handbooks of Modern Statistical Methods*. CRC Press, Boca Raton, FL, 2010.
- [13] Goodchild, M.F. Citizens as sensors: The world of volunteered geography. *GeoJournal* 69, 4 (Aug. 2007), 211~221.
- [14] Gore, A. The digital Earth: Understanding our planet in the 21st century. *Australian Surveyor* 43, 2 (1998), 89~91.
- [15] Jordan, L.J. Flood map delays spur angst for Gulf Coast, but it may be for nothing. *Djournal.com* (Mar. 26, 2006); <http://goo.gl/IIzvzv>.
- [16] Kemp, K.K. *Encyclopedia of Geographic Information Science*. SAGE Publications, Thousand Oaks, CA, 2007.
- [17] Krause, A., Horvitz, E., Kansal, A., and Zhao, F. Toward community sensing. In *Proceedings of the Seventh International Conference on Information Processing in Sensor Networks* (St. Louis, MO, Apr. 22~24). IEEE Computer Society, Washington, D.C., 2008, 481~492.
- [18] Krumm, J. A survey of computational location privacy.

- Personal and Ubiquitous Computing* 13, 6 (Aug. 2009), 391~399.
- [19] Kumar, V., Shekhar, S. and Fagmous, J., Eds. Computing & climate. Computing in Science and Engineering 17, 6 (Nov./Dec. 2015).
- [20] Lovell, J. Left-hand-turn elimination. The New York Times (Dec. 9, 2007).
- [21] Manyika, J., Institute, M.G., Chui, M., Brown, B., Bughin, J., Dobbs, R., Roxburgh, C., and Byers, A.H. Big Data: The Next Frontier for Innovation, Competition, and Productivity. McKinsey Global Institute, 2011; <http://goo.gl/BWJPqP>.
- [22] McMaster, R.B. and User, E.L. A Research Agenda for Geographic Information Science. CRC Press, Boca Raton, FL, 2004.
- [23] National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. IT Roadmap to a Geospatial Future. Report of the Committee on Intersections Between Geospatial Information and Information Technology. The National Academies Press, Washington, D.C., 2003.
- [24] National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. Global Navigation Satellite Systems: Report of a Joint Workshop of the National Academy of Engineering and the Chinese Academy of Engineering. The National Academies Press, Washington, D.C., 2012.
- [25] National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. Priorities for GEOINT Research at the National Geospatial-Intelligence Agency. The National Academies Press, Washington, D.C., 2006.
- [26] National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. Successful Response Starts with a Map: Improving Geospatial Support for Disaster Management. The National Academies Press, Washington, D.C., 2007.
- [27] National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. Figure 3.1: The precision of current geodetic applications as a function of the required time interval. In Precise Geodetic Infrastructure: National Requirements for a Shared Resource. The National Academies Press, Washington, D.C., 2010.
- [28] National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. New Research Directions for the National Geospatial-Intelligence Agency. The National Academies Press, Washington, D.C., 2010.
- [29] National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. Understanding the Changing Planet: Strategic Directions for the Geographical Sciences. The National Academies Press, Washington, D.C., 2010.
- [30] National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. Frontiers in Massive Data Analysis. The National Academies Press, Washington, D.C., 2013.
- [31] National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. Continuity of NASA Earth Observation from Space: A Value Framework (prepublication draft). The National Academies Press, Washington, D.C., 2015; <http://www.nap.edu/read/21789/chapter/1>.
- [32] National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. Land change modeling approaches. In Advancing Land Change Modeling: Opportunities and Research Requirements. The National Academies Press, Washington, D.C., 2014.
- [33] National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine: Committee on Human and Environmental Exposure Science in the 21st Century. Exposure Science in the 21st Century: A Vision and a Strategy. The National Academies Press, Washington, D.C., 2012.
- [34] National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine: Panel on Confidentiality Issues Arising from the Integration of Remotely Sensed and Self-Identifying Data. Putting People on the Map: Protecting Confidentiality with Linked Social-Spatial Data. The National Academies Press, Washington, D.C., 2007.
- [35] National Science Foundation. Report of the NSF Workshop on Intelligent Systems Research to Support Geosciences and the EarthCube Mission. Arlington, VA, Mar. 2015; <http://goo.gl/MyBsQY> (workshop report summary <http://is-geo.org/report/>).
- [36] National Science Foundation. An NSF Workshop to Identify Interdisciplinary Data Science Approaches and Challenges to Enhance Understanding of Interactions of Food Systems with Energy and Water Systems. The National Institute of Food and Agriculture, Washington, D.C., Oct. 2015; <http://goo.gl/GCQ2fj>.
- [37] Okolloh, O. Ushahidi, or 'testimony': Web 2.0 tools for crowdsourcing crisis information. Participatory Learning and Action 59, 1 (May 2009), 65~70.
- [38] Open GIS Consortium. Open GIS Simple Features for SQL; <http://www.opengis.org>
- [39] Parkinson, B.W. and Spilker, J.J. Global Positioning System: Theory and Applications, Volume One. The American Institute of Aeronautics and Astronautics, Reston, VA, 1996.
- [40] Pfoser, D., Tao, Y., Mouratidis, K., Nascimento, M.A.,

- Mobel, M., Shekhar, S., and Huang, Y., Eds. Challenge and Vision Track. In the 12th International Symposium on Spatial and Temporal Databases, Volume 6849 of Lecture Notes on Computer Science (Minneapolis, MN, Aug. 24–26). Springer, Berlin, Heidelberg, Germany, 2011; <http://sstd2011.cs.umn.edu/>.
- [41] Pomfret, K. Latitudes and Attitudes: Zooming In on Geospatial Data, Privacy, and the Law in the Digital Age. Centre for Spatial Law and Policy, Richmond, VA, Mar. 27, 2013; http://www.spatiallaw.com/Uploads/Latitudes_and_Attitudes.pdf.
- [42] Pomfret, K.D. Geotargeted Alerts: Potential Impact of Privacy Concerns. The National Academy of Sciences, Washington D.C., Feb. 21, 2013.
- [43] Regalado, A. New Google Earth Engine. ScienceInsider (Dec. 3, 2010); <http://news.sciencemag.org/technology/2010/12/new-google-earth-engine>.
- [44] Richmond, R. Digital help for Haiti. The New York Times (Jan. 27 2010).
- [45] Ripley, B.D. Spatial Statistics, Volume 575. John Wiley & Sons, Hoboken, NJ, 2005.
- [46] Samet, H. The Design and Analysis of Spatial Data Structures. Addison-Wesley Series in Computer Science, Reading, MA, 1989.
- [47] Samet, H. Foundations of Multidimensional and Metric Data Structures. The Morgan Kaufmann Series in Computer Graphics, San Francisco, CA, 2006.
- [48] Schiller, J. and Voisard, A. Location-Based Services. Elsevier, San Francisco, CA, 2004.
- [49] Sellis, T. et al., Eds. Spatio-Temporal Databases: The CHOROCHRONOS Approach. Lecture Notes in Computer Science, Springer-Verlag, Berlin, Germany, 2003.
- [50] Shekhar, S. and Chawla, S. Spatial Databases: A Tour. Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ, 2003.
- [51] Shekhar, S., Evans, M.R., Kang, J.M., and Mohan, P. Identifying patterns in spatial information: A survey of methods. Wiley Interdisciplinary Reviews: Data Mining and Knowledge Discovery 1, 3 (May/June 2011), 193~214.
- [52] Shekhar, S., Feiner, S., and Aref, W. From GPS and virtual globes to spatial computing—2020. GeoInformatica 19, 4 (Oct. 2015), 799–832.
- [53] Shekhar, S. and Xiong, H. Encyclopedia of GIS. Springer, New York, 2008.
- [54] Snow, J. On the Mode of Communication of Cholera. John Churchill, London, England, 1855.
- [55] Sobel, D. Longitude. Walker Books, London, U.K., 2010.
- [56] U.S. EPA Office of Air and Radiation. The Inside Story: A Guide to Indoor Air Quality. Technical Report EPA 402-K-93-007. U.S. Environmental Protection Agency, Washington, D.C.; <http://goo.gl/RkZUBU>.
- [57] Uttal, D.H. and Cohen, C.A. Spatial thinking and STEM education: When, why, and how. Psychology of Learning and Motivation 57, 2 (2012), 147~181.