

一种改进的地理交通信息热图可视化方法

聂俊岚^{1,2}, 辛姝悦^{1,2}, 张继凯^{1,2}, 郭栋梁^{1,2}

(1. 燕山大学 河北省计算机虚拟技术与系统集成重点实验室, 河北 秦皇岛 066004; 2. 燕山大学 信息科学与工程学院, 河北 秦皇岛 066004)

摘要:为了解决图可视化中的边混乱问题,并展现与地理信息相关的数据信息,在基于地理交通信息的边绑定算法基础上,利用热图展现交通路径的数据信息,通过热度值与颜色之间的映射展现路径上人口迁徙频繁程度;为解决热图可视化过程中计算速度问题,利用四叉树结构对地域进行划分,并将热点按照影响域与地域挂接,加快热度值计算速度。实验结果表明:引入热图的基于地理交通信息边绑定算法在有效降低图的混乱度基础上,实现了热度强度的直观展现;四叉树结构引用,大幅度降低了运算时间,最大加速比约为7.6,取得了良好的运算效果。

关键词:图可视化;地理交通信息;热图;四叉树;边绑定

中图分类号:TP391

文献标志码:A

An Improved Method of Geographic Traffic Information Based on Heatmap Visualization

NIE Junlan^{1,2}, XIN Shuyue^{1,2}, ZHANG Jikai^{1,2}, GUO Dongliang^{1,2}

(1. The Key Lab. for Computer Virtual Technol. and System Integration of HeBei Province, Yanshan Univ., Qinhuangdao 066004, China;

2. Info. Sci. and Eng. College, Yanshan Univ., Qinhuangdao 066004, China)

Abstract: To solve the edge confusion problem in the graph visualization and show GIS-related data information, the heatmap was introduced to represent the path data information, using the mapping between heat intensity and color to present the frequent migration of the path, which was based on the geographic traffic information-based edge bundling algorithm. To deal with speed matters in the heatmap visualization, the quadtree structure was employed to divide the region and then articulate hot spots with regions according to the domain of influence to speed up the heat intensity calculation. The experimental results showed that the geographic traffic information-based edge bundling algorithm with the introduction of heatmap realizes the intuitive representation of heat intensity on the basis of reducing the graph confusion degree effectively. The introduction of quadtree structure significantly reduces the operation time, and the maximum speedup is about 7.6, achieving a good operation effect.

Key words: graph visualization; geographic traffic information; heatmap; quadtree; edge bundling

图是表现数据集关系时最常用的一种可视化方法,通常利用结点和边来揭示数据集的结构及相关信息,其中结点代表数据实体,边则表示实体(结点)间的关系。随着数据量的增大,视觉混乱问题日益突显,不仅影响了图的美观,同时加剧了信息提取的困难程度。为了解决这一问题,国内外学者展开了很多研究,其中主要分为基于图简化^[1-4]和基于边绑定2类技术。前者是一种预处理方法,通过将杂乱拥挤的结点簇压缩成一个或多个新结点,并

根据连接关系构建出新的边,从而达到降低图复杂度的目的,因此这种方法不适用于点位置具有特定含义的图。边绑定技术则是将具有相同属性的边通过弯曲形变聚合成一束,展现出一种抽象整齐的可视化效果进而增强图的可读性。目前,常见的边绑定技术主要分为基于力引导的边绑定^[5]、基于几何的边绑定^[6]和基于图像的边绑定^[7]等几大类。常见的网络图主要关注节点间拓扑关系、自身属性以及图的布局等方面,而在地理交通信息相关

收稿日期:2014-08-15

基金项目:国家“863”高技术研究发展计划资助项目;河北省科技支撑计划项目(1420311D);河北省自然科学基金项目(F2013203099);燕山大学青年教师自主研究计划项目(13LGB016);河北省高等学校科学技术研究重点项目资助(ZH2012016)

作者简介:聂俊岚(1962—),女,教授,博士生导师。研究方向:虚拟现实;计算机仿真。E-mail:niejl3@163.com

http://jsuese.scu.edu.cn

的图可视化中,除了对象之间的连接关系外,某些具体的地理交通信息往往影响着用户对所描述网络图的感知能力。因此在前期工作中提出了一种将图可视化与地理交通信息相结合的边绑定算法,将已有的地理交通信息引入到边绑定过程中。经过边绑定处理,能较好地解决原图的边混乱问题,同时有效展现了相关的地理交通信息。但是这种算法仅通过绑定后曲线的粗细代表交通路径上某特定事件发生的频繁程度,理解起来比较困难,使用者对粗细判断往往没有统一的标准,因而具有一定的局限性。

为了方便、直观地展现事件发生的频繁程度,在基于地理交通信息的边绑定基础上,利用热图可视化技术,通过颜色使用图示化方法表达事件数据。鉴于人们对颜色与温度之间的对应感知性很高,热图可以非常直观的展示数据大小,使用者往往能一目了然,并根据数据的分布密度分析未来趋势。

热图是一种利用颜色代表某一特定事件的热度或重要性的可视化技术^[8],被广泛应用在很多领域中。2007年 Spakov 等^[9]利用热图技术实现了基于视线轨迹实验研究及产品显示可用性研究的人眼凝视数据聚合可视化,并对传统方法加以扩展,使用人眼凝视数据调节热图的透明度。2009年 Bojko 等^[10]描述了几种应用在视觉轨迹可视化方面的热图技术,并提出如何选取恰当的热图技术及其正确使用方法。2010年 Blignaut 等^[11]提出一种适用于视线轨迹数据的热图构建算法,该算法通过调节自定义参数,如视域范围、透明度、颜色范围以及物体被观测到的可能性等,使用户筛选出所需的信息。

2007年, Pryke 等^[12]将热图应用在高密度信息关键数据可视化方面,利用热图解决多目标优化问题,并将其应用在一个多组分矿物化学系统中。2011年 Mashima 等^[13]设计了一个用于可视化 Last.fm 社交音乐平台用户行为操作的系统,该系统利用等值线和热图对平台的大规模动态相关数据进行可视化并提取出特定信息。

在软件系统可视化方面,2009年 Roethlisberger 等^[8]评估了热图在集成开发环境上的应用,并分析了不同类型热图在集成开发环境下引导开发者研发软件的能力。2013年, Benomar 等^[14]利用热图在现有可视化工具的基础上,研究软件在时间和其他维度上的动态性,并应用在 JHotDraw 程序架构和 Pooka 电子邮件客户端上。

由于前述工作对数据均无实时性处理要求,并未考虑热图的时间复杂度和并行性问题,因此 Du-

chowski 等^[15]于2012年将 GPU 并行计算引入到热图计算中,大幅度降低其时间复杂度,提高了视线轨迹动态数据可视化的实时性。但是其所使用的数据量较小,只有24条视线轨迹数据,当数据规模更大时,单纯的 GPU 加速也无法满足热图可视化的速度需求。

作者通过将边绑定处理后的线条插值点模拟为热点,利用高斯分布函数计算热图。由于网络图的数据规模比较大,对热图绘制的实时性有较高的要求,单纯使用 GPU 加速仍具有很高的时间复杂度。因此提出一种改进的四叉树算法,利用热点的影响范围和地域相关性将热点与节点相挂接,通过检索四叉树快速获取所需计算热点,大幅度缩减运算时间。

1 基于地理交通信息的边绑定算法

基于地理交通信息的边绑定算法(traffic information-based edge bundling, TIEB)利用改进的 Dijkstra 算法^[16],通过增加虚拟路径将原图点融入交通网络中,并通过多次迭代为原图中每组结点计算出一组相关的交通路径信息;使用若干条相切于路径的贝塞尔曲线^[17]代替原图边,根据相关路径和曲线拟合控制点对相似边进行边绑定,并根据某种规则进行控制点合并,使形态、位置接近的曲线段合并为一条,以减少图中的曲线数量,降低图的复杂度。图1(a)中 P_1Q_1 和 P_2Q_2 为原图中2条边, AB 、 BC 、 CD 为与2边有关系的1组交通路径,图1(b)为使用 TIEB 算法绑定后的结果。

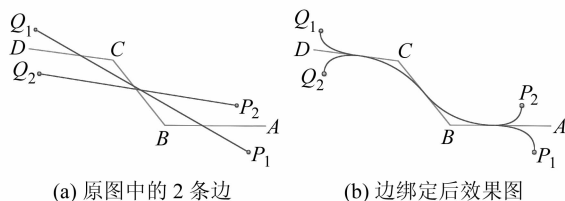


图1 边绑定示意图

Fig.1 Schematic diagram of TIEB

2 热图绘制

为了直观展示交通路径上事件发生的相关信息,将边绑定后的曲线插值点模拟为热点,利用热图图示化热点数据的分布及其相互关系,并通过一张具备显著颜色差异的图片来呈现事件热度,利用亮色表示事件发生频率较高或事件分布密度较大的数据,暗色反之。

2.1 热度计算

通过 TIEB 算法,为每条原图边计算出一组贝塞尔曲线来表现原图点之间的连接关系。为了便于热图计算,将连续曲线按空间距离均匀插值为一系列离散点,在可视化过程中将这些离散点作为热点参与热度计算:每个热点都会对周围区域产生一定的影响,其影响力度可以用式(1)所示的高斯分布函数表示,即某区域受到的热点影响力与热点距离呈反比关系,在热图计算时需将每个热点产生的影响力进行叠加。

$$f(x) = \frac{\mu}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}} \quad (1)$$

其中: x 为热点与当前采样点的距离; μ 为高斯函数的影响比例因子, μ 越大表明点的影响力越大; σ 为高斯函数中的尺度因子, σ 越大则热点影响力范围越广。

将原图所代表的区域离散成一矩形点阵,点阵中的每个采样点都对应着某一特定的地理坐标,每个采样点热度的大小均采用 1 个 GPU 线程进行计算。计算方法:根据点阵大小和点阵代表的地理区域计算当前采样点的地理坐标,如果点阵表示的区域范围为纬度 $Lat_1 \sim Lat_2$,经度 $Lon_1 \sim Lon_2$,点阵大小为 $M \times M$,则第 r 行 c 列的采样点表示的坐标纬度 lat 和经度 lon 分别如式(2)、(3)所示。获取到所有热点信息后,根据式(1)计算每个热点对当前采样点的影响。

$$lat = r \times (Lat_2 - Lat_1) / M + Lat_1 \quad (2)$$

$$lon = c \times (Lon_2 - Lon_1) / M + Lon_1 \quad (3)$$

将所有热点对当前采样点的影响值进行累加即可得到该采样点的热度,计算结束后各个采样点的热度就是对应地理坐标的最终热度值。为了从立体角度进一步增强对人口迁徙事件热度的感知,将热图与 3 维地球相结合,采样点的热度值作为大地高度值进行 3 维拉伸,利用坐标转换公式^[18]将区域的大地坐标 (B, L, H) 转换成空间直角坐标 (X, Y, Z) ,并根据热度值查找颜色表获取对应颜色进行渲染。

2.2 利用四叉树对热图加速

在热度计算时需计算每个热点对整个区域的影响,如果区域内包含 N 个热点,而点阵大小为 $M \times M$,计算规模则为 $N \times M \times M$ 次高斯运算,产生的时间复杂度为 $O(NM^2)$ 。鉴于高斯分布具有如下特征:在面积分布上,正态曲线横轴区间 $(\mu - 2.58\sigma, \mu + 2.58\sigma)$ 内的面积占总面积的 99%。从热度计算的角度考虑,当热点与某处地理位置的距离超过热点尺

度参数 σ 的 3 倍时,热点对此处产生的热度值近似为 0。因为每个热点的影响范围具有区域性,对于某一地理位置而言,只有部分热点对其产生的热度值不为 0。为了简化运算缩短计算时间,使用四叉树结构对原图所代表的区域进行分割,通过检索四叉树将热点按照影响域与节点挂接。各个采样点计算热度值时,只需根据其代表的地理位置,搜索四叉树筛选出需要计算的热点,减小问题规模从而达到降低计算时间复杂度的目的。

2.2.1 四叉树构建

采用自顶向下递归构建完全四叉树,将原图代表的区域作为根节点,通过对四叉树进行遍历将整个区域分割成若干个层次,下层每个结点所代表的区域面积是上层结点的 1/4,并对四叉树作如下规定:

1) 四叉树节点组织结构见图 2,节点的序号按照广度排序的顺序编号,其中,根节点序号为 0。

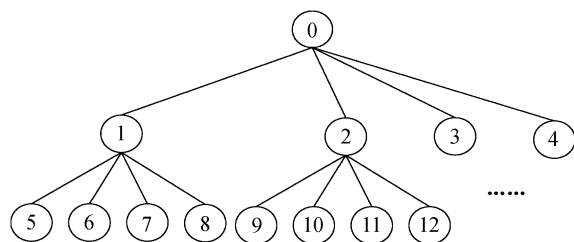


图 2 节点组织结构

Fig. 2 Structure of quadtree node

2) 四叉树每个节点包括 5 部分信息:

- ①该节点代表的地理区域;
- ②该节点的父节点指针和 4 个子节点指针;
- ③对该节点所代表区域产生热度值不为 0 的热点的数量 PN ;
- ④热点在线性内存中的下标范围 Min, Max ;
- ⑤节点序号。

2.2.2 热点挂接

为了给每块区域挂接对其有影响的热点,空间分割完毕后还需要对四叉树进行检索。任意一个热点挂接过程如下:从根节点出发,如果当前节点为叶子节点,则直接将该热点挂接至当前节点下,并将该节点 PN 值加 1;如果当前节点不是叶子节点,则进行判断:以热点数据的 3σ 为半径构建一个圆形影响区域,若此影响区域完全被包含在当前节点的某一个子节点代表的地域范围内,则继续对该子树递归遍历;如果热点的圆形影响区域均不能被四个子节点所代表的区域范围完全包含,则将热点挂接至当前节点下,并将 PN 值加 1。以图 3 为例:热点 P 的作

用域无法被根节点的任意子节点所代表的地理区域完全包含,所以热点 P 被挂接至根节点下;热点 Q 的作用域可以被根节点的左上子节点包含,但是却无法被左上子节点的任意子节点完全包含,所以热点 Q 被挂接至根节点的左上子节点下。

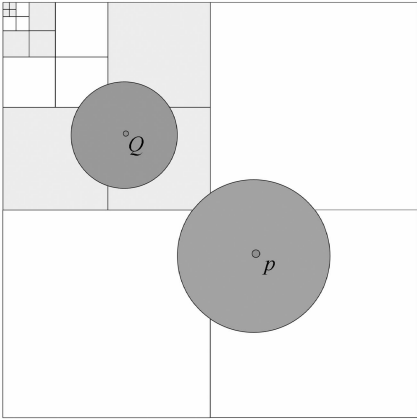


图3 热点按作用域与节点挂接

Fig.3 Articulating hot spots with node according to the domain of influence

与相应节点挂接后的热点数据进一步传入显存用于进行热度并行计算,为了充分利用带宽,将数据组织成连续的线性内存区域,组织过程如图4所示:从根节点出发遍历二叉树,同时设置一个标记索引 $index$ 用于跟踪热点信息,初始化为0,具体算法描述如下:

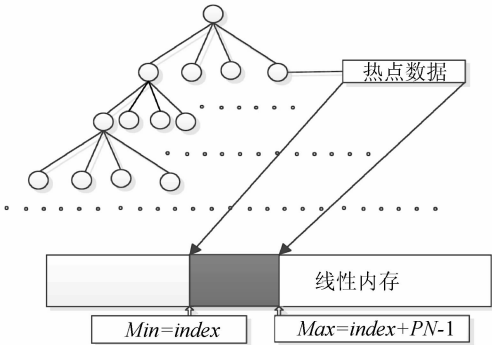


图4 热点数据传入线性内存

Fig.4 Afferenting hot spots into linear memory

- Step1: 对当前树节点,判断节点的 PN 值是否为0。如果为0,则将节点的热点下标范围 Min 和 Max 设为 -1 ,直接跳转到 Step4;否则,将节点的 Min 值置为 $index$, Max 置为 $index + PN - 1$ 。
- Step2: 将挂接在节点下的 PN 个热点数据依次拷贝到线性内存区域中。
- Step3: $index = index + PN - 1$ 。
- Step4: 判断遍历是否结束,如果没有结束则重复 Step1;否则,将线性内存中的数据传入显存。

3 实验结果分析

在 Windows 7 操作系统下使用 OSG 3 维图形引擎以及 GLSL 着色语言进行图的快速绘制,并利用 CUDA 进行热度值加速计算;所用硬件环境为 Intel E5-2620 2.0 GHz, 32 G RAM, 显卡为 NVIDIA Quadro K2000 + NVIDIA Tesla K20c;所用实验数据为美国人口迁徙数据,其中包含 6 516 个顶点和 9 779对边;地理交通信息为美国主要公路矢量数据,其所含路径数量为 209 条。

3.1 绑定结果及分析

图5为美国人口迁徙数据的可视化结果。图5(a)中直接使用直线表示2点之间的关系,由于未进行边绑定处理,所以表现结果杂乱无章,很难提取出有效信息;图5(b)为实验使用的美国公路简图;图5(c)和5(d)分别为基于几何的边绑定算法^[6](geometry-based edge bundling, GBEB)可视化效果和基于力引导的边绑定算法^[5](force-directed edge bundling, FDEB)可视化效果,这2种算法均能将原图边有效地进行绑定,提供清晰可见的高层次边模式,但表现的地理交通信息相对较少;图5(e)为基于地理交通信息的边绑定可视化效果(TIEB),通过对比可以看出,该算法在对原图边进行有效的绑定同时,更侧重于展现相关地理交通信息,其绑定结果与图5(b)美国公路路径信息基本吻合,但是这种算法通过对重复曲线进行加粗处理来表示路径上人口迁徙频繁程度,并没有提供统一的判定标准,使用者需对曲线的粗细进行判断来进一步获取相关信息;图5(f)为提出的算法效果,在TIEB算法基础上进一步扩展,利用热图代替原图中的边和点,通过颜色差别展现不同路径上的人口迁徙频繁程度,并根据单一路径上的颜色变化细化迁徙热度粒度,左上角的颜色条带为实验使用的颜色表,其中最右端颜色代表热度强度最强,最左端颜色代表最弱,因此图中越接近最右端颜色的区域代表人口迁徙途经次数越多的公路,这些公路很有可能为交通主干道,人们出行更倾向选择的道路,其他颜色的路线根据颜色表中对应的等级表示自身交通繁忙程度;图5(g)和5(h)展示了将热图与具有真实卫星影像的3维地球相结合的效果,其中,图5(h)包括迁徙活动的整体效果和局部视图,通过局部视图可以看出热度的强度越大,相应的高程值越高,用户可以根据颜色和高程值共同获取所需信息。

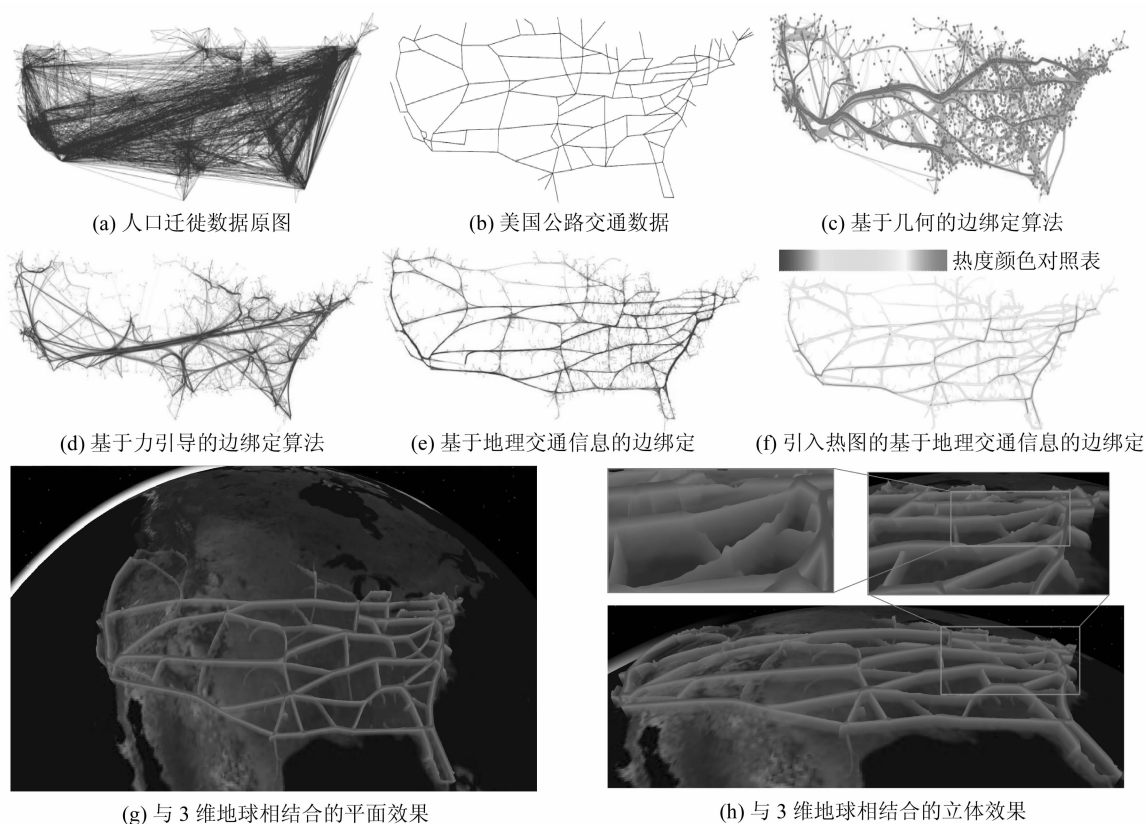


图 5 美国人口迁徙数据可视化

Fig.5 US population migration visualization

3.2 热图加速及性能分析

3.2.1 热点筛选

构建四叉树并挂接相关热点后,就可以通过检索四叉树筛选各个采样点所需计算的热点信息进行热度计算。此过程利用 GPU 并行实现,因此将四叉树结构按照节点序号顺序依次传递到显存上。为了减少内存-显存间数据传输量,降低带宽开销,同时对四叉树结构进行简化,经简化后每个节点只包括 2 部分信息:1)该节点代表的地理区域;2)挂接在该节点下的热点在线性内存中的下标范围 Max 、 Min 。

对每个采样点而言,检索四叉树进行热度计算时为了避免 GPU 难以执行的递归操作,可利用广度存储的特性,根据节点序号的关系进行检索:若某一节点的序号为 Num ,则其 4 个子节点的序号分别为 $4Num + 1$ 、 $4Num + 2$ 、 $4Num + 3$ 、 $4Num + 4$,其中,四叉树根节点的序号为 0。以图 6 为例说明检索过程:从根节点出发,其热点范围下标 Min 和 Max 的值分别为 n 和 m ,则在存储热点的线性存储区域中获取地址范围在 n 和 m 间的所有热点信息,并依次判断热点与采样点间的距离:如果距离小于 3σ ,则计算该热点对采样点产生的热度值并叠加;否则舍弃该热点。其后根据采样点的地理坐标判断其属于第 4

个子节点表示的地理范围,利用父子节点存储地址的关系找到节点序号为 4 的子节点,继续检索该子树。以此类推,递归进行 N 次(N 为树的层数)就可以获取当前采样点所需计算的全部热点信息并进行计算累加。

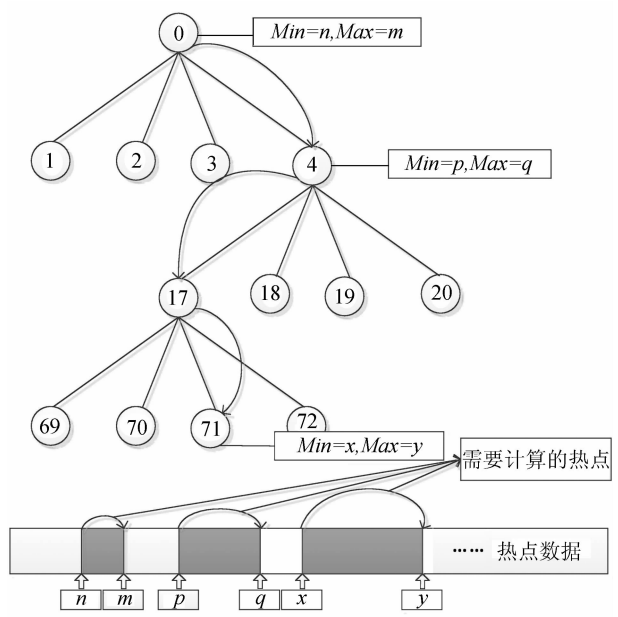


图 6 检索四叉树筛选热点

Fig.6 Retrieving quadtree to select hot spots

检索四叉树进行热度计算的递归伪代码如下:
检索四叉树并计算热度值(*root*)
function 检索四叉树并计算热度值(*node*)
for $i = 1$ to n (n = 四叉树层数)
if *node* 下挂接有热点
for 存储热点线性区域中地址范围在 *node*_
Min 至 *node*_*Max* 间的所有热点
if 热点与采样点间的距离小于 3σ
计算热点对采样点产生的热度值并叠加
end if
end for
end if
end function

根据采样点的地理坐标判断其属于哪个子节点表示的地理范围,根据父子结点序号关系找到该子节点
end for
end function

3.2.2 性能分析

表1展示了使用提出的四叉树结构加速时,热图计算时间与四叉树层数的关系,图7分别展示了主要性能随层数变化的曲线图。其中,CPU端计算时间主要由四叉树构建和热点挂接决定,GPU端计算时间则表示热度计算所需时间。可以看出,当层数为1,即不使用四叉树加速时,GPU计算时间和总时间都为最长;当层数增加至6~9层时,运算时间达到最小且基本稳定,相对于非四叉树模式的加速

比约为7.6,由图7(a)可看出此时加速比处于峰值区域;当层数超过10层后,图7(b)中GPU运行时间基本没有变化,而图7(c)所表示的CPU运算时间由于四叉树构建、热点挂接、数据传递等开销增大有明显上升,导致总运算时间上升,因此图7(a)中加速比曲线呈下降趋势。可见提出的利用四叉树加速的热图计算方法具有较高的加速比,有效地降低了时间复杂度,且算法在合理四叉树层数范围内,即6~9层时较为稳定。

表1 四叉树层数与热度计算时间的关系
Tab.1 Relationship between the layers of quadtree and operation time

四叉树 层数	CPU 端计算 时间/s	GPU 端计算 时间/s	热度总计算 时间/s	加速比
1	6.739	383.636	394.774	1.000
2	6.789	122.648	133.802	2.950
3	6.864	58.422	69.732	5.661
4	6.853	44.132	55.411	7.124
5	6.867	41.106	52.822	7.473
6	6.882	40.623	51.948	7.599
7	6.896	40.622	51.839	7.615
8	6.891	40.591	51.808	7.620
9	6.885	40.623	51.816	7.619
10	6.942	40.670	52.011	7.590
11	7.145	40.654	52.229	7.559
12	8.034	40.656	53.855	7.330

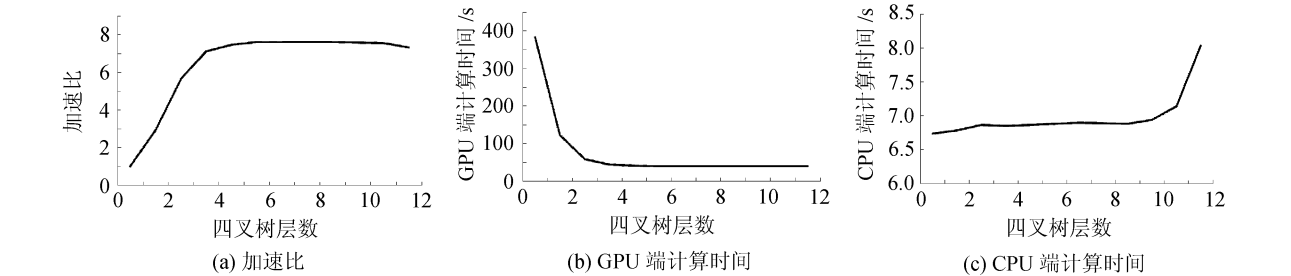


图7 四叉树层数与计算性能关系
Fig.7 Relationship between the layers of quadtree and calculated performance

4 结论

在基于地理交通信息的边绑定基础上利用热图可视化技术,通过热度值与颜色之间的映射展现交通路径上人口迁徙频繁程度,并利用四叉树结构将大量热点数据按影响域划分,快速计算相关热度值。
跟传统边绑定算法相比,提出的算法不仅有效地展现了相关地理交通信息,同时通过引入热度可视化技术,直观清晰地展示了交通路径上人口迁徙

数据,能够辅助用户快速寻找隐藏在大数据中的模式或趋势,有效扩展了图的信息承载量;利用四叉树结构在CPU端进行热点挂接预处理,避免了GPU上利用递归和回溯进行逻辑判断,并在内存-显存数据传输过程中简化四叉树数据结构,减小显卡带宽开销,通过检索四叉树快速筛选需要计算的热点,减小问题规模从而降低计算时间复杂度,取得了良好的可视化效果。

参考文献:

- [1] Abello J, van Ham F, Neeraj K. ASK-GraphView: A large scale graph visualization system[J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2006, 12(5): 669 – 676.
- [2] Archambault D, Munzner T, Auber D. Grouse: Feature-based, steerable graph hierarchy exploration[C]//Proceedings of the 9th Joint Eurographics/IEEE VGTC conference on Visualization. Sweden: Eurographics Association, 2007: 67 – 74.
- [3] Zinsmaier M, Brandes U, Deussen O, et al. Interactive level-of-detail rendering of large graphs[J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2012, 18(12): 2486 – 2495.
- [4] Hui L, Jiawei Z, Haidong C, et al. Visualizing large-scale graph based on line integral convolution[J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2013, 25(9): 1288 – 1295.
- [5] Holten D, Van Wijk J J. Force-directed edge bundling for graph visualization[J]. Computer Graphics Forum, 2009, 28(3): 983 – 990.
- [6] Weiwei C, Hong Z, Huamin Q, et al. Geometry-based edge clustering for graph visualization[J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2008, 14(6): 1277 – 1284.
- [7] Telea A, Ersoy O. Image-based edge bundles: simplified visualization of large graphs[J]. Computer Graphics Forum, 2010, 29(3): 843 – 852.
- [8] Rothlisberger D, Nierstrasz O, Ducasse S, et al. Supporting task-oriented navigation in IDEs with configurable Heat-Maps[C]//Proceedings of the 17th IEEE International Conference on Program Comprehension. Vancouver, BC: IEEE, 2009: 253 – 257.
- [9] Spakov O, Miniotas D. Visualization of eye gaze data using heat maps[J]. Electronics and Electrical Engineering, 2007(2): 55 – 58.
- [10] Bojko A A. Informative or misleading? Heatmaps deconstructed[J]. Human-Computer Interaction, 2009, 5610: 30 – 39.
- [11] Blignaut P. Visual span and other parameters for the generation of heatmaps[C]//Proceedings of the 2010 Symposium on Eye-Tracking Research & Applications. Austin, Texas: ACM, 2010: 125 – 128.
- [12] Pryke A, Mostaghim S, Nazemi A. Heatmap visualization of population based multi objective algorithms[J]. Evolutionary Multi-Criterion Optimization, 2007, 4403: 361 – 375.
- [13] Mashima D, Kobourov S G, Hu Y. Visualizing dynamic data with maps[J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2012, 18(9): 1424 – 1437.
- [14] Benomar O, Sahraoui H, Poulin P. Visualizing software dynamicities with heat maps[C]//Proceedings of 2013 First IEEE Working Conference on Software Visualization (VISOFT). Eindhoven: IEEE, 2013: 1 – 10.
- [15] Duchowski A T, Price M M, Meyer M, et al. Aggregate gaze visualization with real-time heatmaps[C]//Proceedings of the Symposium on Eye Tracking Research and Applications. Santa Barbara, California: ACM, 2012: 13 – 20.
- [16] Dijkstra E W. A short introduction to the art of programming[M]. Holland: Technische Hogeschool Eindhoven, 1971.
- [17] Farin G. Curves and surfaces for CAGD[M]. 5th ed. San Francisco: Morgan Kaufmann, 2001.
- [18] 朱华统, 扬元喜, 吕志平. GPS 坐标系统的变换[M]. 北京: 测绘出版社, 1994: 153 – 154.

(编辑 杨 蓓)