

DOI:10.13203/j.whugis20160352



文章编号:1671-8860(2018)09-1416-06

# 一种针对室内疏散的集成 Hilbert 曲线的 $R^*$ 树空间索引

牛 磊<sup>1</sup> 宋宜全<sup>2</sup> 张宏敏<sup>1</sup> 侯绍洋<sup>1</sup>

1 河南城建学院测绘与城市空间信息学院,河南 平顶山, 467036

2 天津师范大学地理与环境科学学院,天津, 300387

**摘 要:**基于位置的服务需要快速查询、插入和删除研究对象,这种需求在室内疏散相关的应用中被进一步加强,因此有必要引入空间索引优化针对室内空间对象的操作效能。在室内紧凑空间环境下,现有的空间索引效率较低,所以将  $R^*$  树索引和 Hilbert 曲线相结合,提出了一种新型的集成 Hilbert 曲线的索引。将这种新型索引和标准  $R^*$  树索引进行对比,结果表明,新索引能够显著提升多种空间操作效率。

**关键词:**室内位置;疏散;Hilbert 曲线; $R^*$  树

**中图分类号:**P208

**文献标志码:**A

室内疏散方案可以指导用户从空间内的一点到达另一点,此类应用离不开位置范围的确定<sup>[1-6]</sup>。在确定位置范围的过程中引入空间索引,可以减少此过程的时间耗费和降低定位出错的几率<sup>[7-11]</sup>。

用于优化空间操作的典型索引有四叉树索引、KD 树索引和 R 树索引等<sup>[12-16]</sup>。这些索引通过减小搜索空间范围达到优化操作性能的目的。在这类索引中,面向对象的 R 树索引空间操作性能表现较优。不同于四叉树和 KD 树这些单纯从平衡节点数据量出发的通用索引,R 树索引通过生成空间上包裹对象集合的最小外接矩形框来构建索引<sup>[17-18]</sup>。R 树从诞生到现在,衍生出了 R+ 树和  $R^*$  树等变种。在这些 R 树变种中, $R^*$  树因其对于空间操作的优良性能得到了广泛应用<sup>[12, 19-20]</sup>。

$R^*$  树与标准 R 树一样,也采用最小外接矩形框来包裹空间对象。但是与标准 R 树对重叠叶节点的粗糙处理方式不同, $R^*$  树对于重叠以及溢出叶节点进行考虑平衡的重新插入,以达到减小外接矩形框的重叠空间范围的目的(图 1)。

在使用空间索引的过程中,需要关注的一个

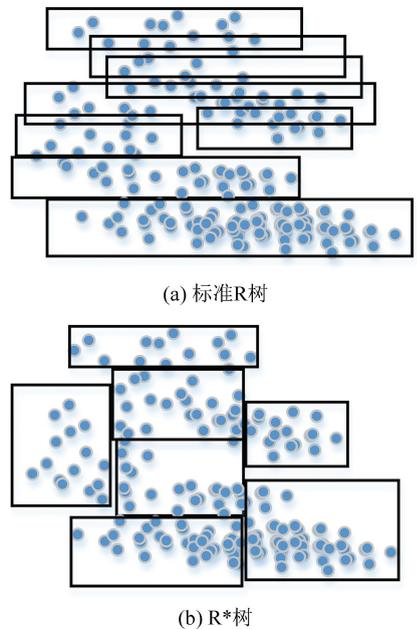


图 1 标准 R 树和  $R^*$  树空间索引效果图  
Fig.1 Diagram of Spatial Classification Results of Classic R Tree and  $R^*$  Tree

关键技术细节是节点的遍历顺序问题。由于对节点的不同遍历方式往往会导致巨大的性能差异,相关研究人员提出了若干空间遍历曲线,以利用

收稿日期:2017-12-04

项目资助:国家自然科学基金(41771433, 41501440, 41571387, 41701454);河南省高等学校重点科研项目(15A170002);河南省重点科技攻关计划(152102310321);河南城建学院学术带头人资助项目;河南城建学院青年骨干教师资助培养项目;天津市科技计划(15ZCZDSF00390)。

第一作者:牛磊,博士,副教授,主要从事三维信息系统、室内建模和疏散研究。niuneilneo@vip.163.com

它们提高空间操作效率<sup>[19,21]</sup>。其中,以 Peano 曲线、Moore 曲线和 Hilbert 曲线最为著名<sup>[1,19,22]</sup>。在这些曲线中, Hilbert 曲线以其良好的局部相关性和位置编码接近真实坐标的特性被广泛关注(见图 2)<sup>[23-25]</sup>。局部相关性是指曲线上前后遍历的节点在空间操作中被同时使用的几率;位置编

码是指特定空间位置在曲线上利用若干基本方向构成的相对坐标数值(见图 3)。局部相关性好是指在曲线上被顺序遍历的空间对象在空间操作中也有极大几率被同时调用;位置编码无限逼近真实坐标则是指空间遍历曲线上通过无限迭代最终和真实空间坐标拟合的特性。

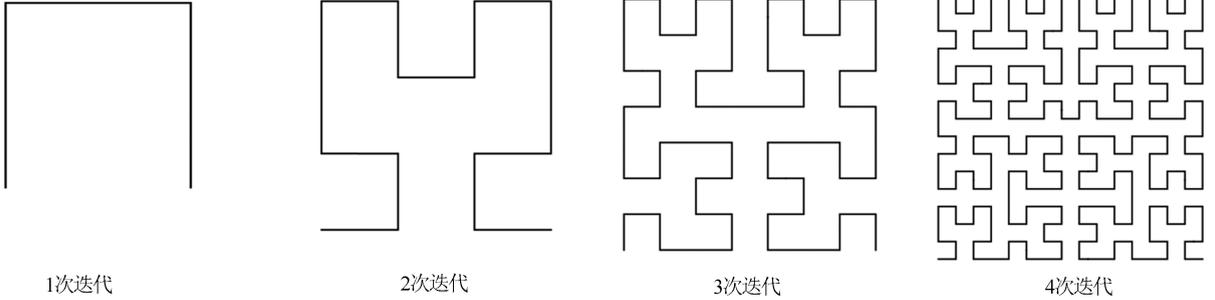


图 2 1 次、2 次、3 次和 4 次迭代的二维 Hilbert 曲线

Fig.2 Graphic Illustration of One Iteration, Two Iterations, Three Iterations and Four Iterations of 2-Dimensional Hilbert Curve

综上所述,本文将 R\* 树对于空间对象聚类的特点和 Hilbert 曲线高效遍历邻近空间对象的特点融合,得到集成 Hilbert 曲线的 R\* 树索引,

利用这种索引能够对室内疏散相关的应用进行优化,从而达到提高空间操作效率的目的。

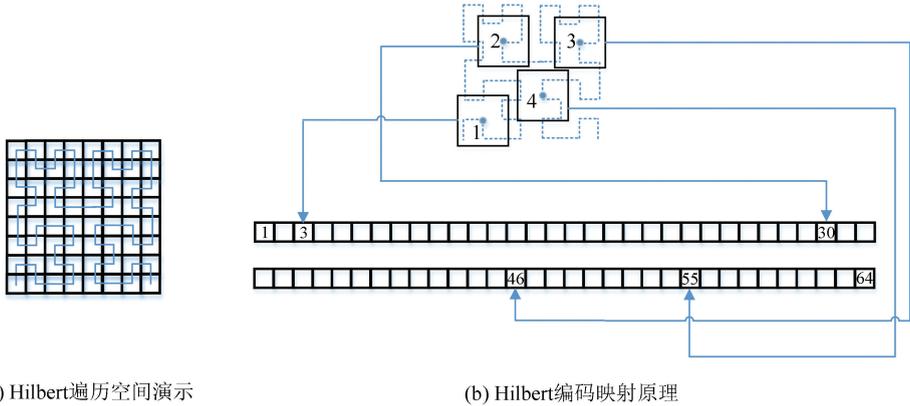


图 3 二维 3 次迭代 Hilbert 曲线遍历空间和编码映射原理

Fig.3 Graphic Demonstration of Traversing and Coding for Hilbert Curve in 2-Dimensional Space

### 1 集成 Hilbert 曲线的 R\* 树索引

构建集成 Hilbert 曲线的 R\* 树需要完成 Hilbert 码的生成、Hilbert 码和 R\* 树的集成这两个步骤。前者是为了利用 Hilbert 曲线对邻近空间对象的优良遍历特性打下基础;后者则是将 Hilbert 码和 R\* 树进行融合以发挥各自特点的必要步骤。

#### 1.1 Hilbert 码生成

本文的 Hilbert 码生成方法的原理来自于文献<sup>[21]</sup>。该方法的特点是采用自下而上的方式生

成 Hilbert 码,并且在生成编码的过程中不断复用若干基本模板基因,以达到快速生成特定位置对应 Hilbert 曲线编码的目的。本文的模板基因是指构成特定维度和迭代次数 Hilbert 曲线的基本空间走向单元。此过程的原理参见图 4 和图 5。图 4 中, $C^3$ 代表最基本的三维 Hilbert 曲线模板基因, $X_1 \leftrightarrow X_3$ 是指  $X_1$  坐标轴和  $X_3$  坐标轴互换之后的模板基因, $X_2 \leftrightarrow X_3$ 是指  $X_2$  坐标轴和  $X_3$  坐标轴互换之后的模板基因, $X_1 \leftrightarrow X_3 \cap X'_1$ ,  $X'_1$  是指  $X_1$  坐标轴和  $X_3$  坐标轴互换,且  $X_1$  和  $X_3$  坐标各自求反的模板基因, $X_2 \leftrightarrow X_3 \cap X'_2$ ,  $X'_2$  是指  $X_2$  坐标轴和  $X_3$  坐标轴互换,且  $X_2$  和  $X_3$  坐标

各自求反的模板基因。图5则描述了使用1次迭代基因模板生成2次迭代三维 Hilbert 曲线的过

程。表1展示了1次迭代三维 Hilbert 曲线编码生成基本模板。

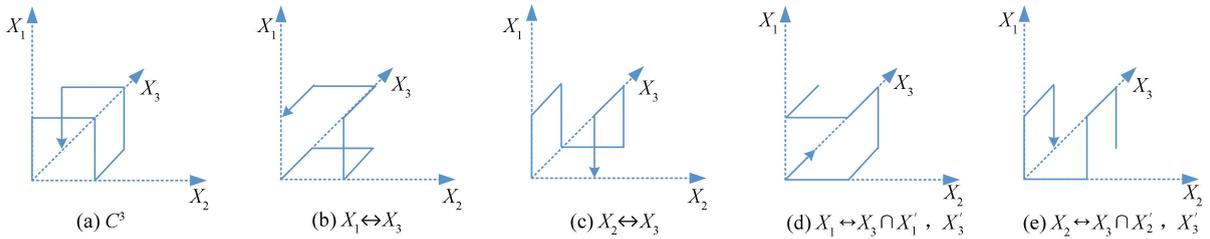


图4 三维 Hilbert 曲线编码生成模板基因展示

Fig.4 Diagram of Template for Generating Hilbert Curve Code Gene in 3-Dimensional Space

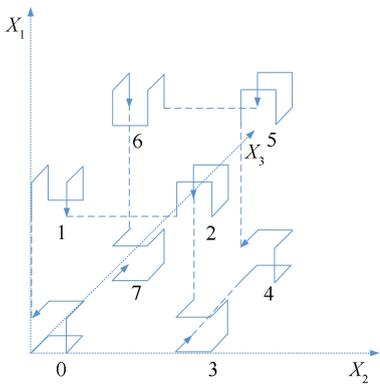


图5 使用1次迭代基因模板生成2次迭代三维 Hilbert 曲线展示

Fig.5 Diagram of Utilizing One Iteration Hilbert Curve to Encode Two Iterations in 3-Dimensional Space

表1 利用1次迭代三维 Hilbert 曲线编码生成基本模板列表

Tab.1 Template for Generating Hilbert Curve Code in 3-Dimensional Space

位置	0号点	1号点	2号点	3号点	4号点	5号点	6号点	7号点
0	000	001	011	010	110	111	101	100
1	000	100	101	001	011	111	110	010
2	000	100	110	010	011	111	101	001
3	101	100	110	111	011	010	000	001
4	000	001	011	010	110	111	101	100
5	000	100	110	010	011	111	101	001
6	011	111	110	010	000	100	101	001
7	101	100	110	111	011	010	000	001

### 1.2 Hilbert 码与 R\* 树的集成

Hilbert 码需要和 R\* 树进行深度整合,才能在空间相关操作中体现出引入 Hilbert 遍历曲线的优势。这就要求在 R\* 树的插入和删除节点相关的操作中引入对于 Hilbert 码的生成和更新,涉及到插入节点、拆分节点和删除节点3个核心算法。其中,插入节点算法负责将当前空间对象插入合适的叶节点中;拆分节点则是当前节点所容纳的对象数量多于设置上限时,需要将当前节

点拆分为多个节点的操作;删除节点则是将所需删除空间对象从 R\* 树中删除。

以上3个 R\* 树的核心操作中,在引入 Hilbert 码之后都需要进行适当的修改,其中最为关键的是在插入空间对象时选择节点。该算法描述如下:

输入:待插入空间对象,涉及的空间节点和内部包含对象。

输出:插入后的空间节点。

处理过程:

- 1)检索当前节点的子对象数目,如果该数目小于预设值上限,则继续检索,否则结束;
- 2)如果待插入对象的 Hilbert 码小于当前节点包含对象的最小 Hilbert 码,那么将待插入对象插入节点包含对象列表的最前端,结束;
- 3)如果待插入对象的 Hilbert 码大于当前节点包含对象的最大 Hilbert 码,那么将待插入对象插入节点包含对象列表的最后端,结束;
- 4)遍历当前节点包含的对象列表,如果发现待插入对象的 Hilbert 码位于列表里的两个对象的 Hilbert 码之间,那么将其插入此位置,结束。

## 2 空间操作实验与数据分析

### 2.1 实验场景与结果展示

实验场景选择的是河南城建学院5号教学楼,该教学楼分为A座、B座和C座3个教学功能区,分别对应该教学楼的实验室区、办公区和教学区。这些功能区通过位于东西两侧的两个长风风雨走廊相连。建筑的数据源是平面设计图纸(见图6)。在图6中使用1号图框标示的范围是B座东侧楼梯区域,针对该区域的空间对象查询操作模拟应急疏散情况下对于室内人员位置的查询;被3个2号图框所圈定的范围是B座二层的3间办公室,针对该区域的空间对象删除操作则

是模拟火灾发生情况下,由于灾害阻挡作用导致的对室内通行空间的删除;被 2 个 3 号图框所圈定的范围是 B 座三层的两间办公室南侧窗户外面的邻近空间,针对这两块通行空间的插入是模拟消防人员通过架设云梯的方式新增建筑物邻近通行空间的场景。

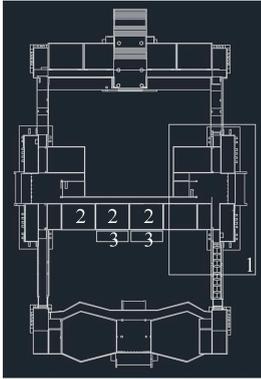


图 6 实验建筑的平面设计图展示  
Fig.6 Illustration of Experiment Building by 2D Floor Plan

针对建筑物的空间对象操作实验,除了以上提到的针对指定范围的空间对象查询、删除和插入,还包括对于完整索引树的遍历。这些空间操作由于单位耗时较短,所以本文展示的实验结果是将其重复 10 000 次所得的总时间耗费。

## 2.2 结果分析与讨论

图 7 展示的是依照 Hilbert 编码升序遍历 R\* 树的曲线,从中能够看出该树在遍历过程中优先经过邻近空间对象。这种依照 Hilbert 码组织空间索引的 R\* 树在表 2 的数据中将空间操作效能优势进行了充分发挥。从表 2 中可以看出,通过引入 Hilbert 遍历曲线,在全树遍历过程中,引入 Hilbert 曲线的 R\* 树相比于普通 R\* 树时间节省了 43.34%;在查询特定空间对象的过程中,时间节省了 47.15%;而在删除操作中,时间更是节省了 70.91%。但是,引入 Hilbert 曲线也有副作用:在插入操作中,由于需要进行较为庞杂的空间坐标向 Hilbert 码的转化,因此引入 Hilbert 曲线的 R\* 树相比于普通 R\* 树时间耗费增加了 70 倍。

但是不能简单地认为由于引入 Hilbert 曲线的 R\* 树在插入对象操作上的时间耗费过大,就不适用于室内位置相关的应用。由于在针对室内位置相关的空间应用中,绝大多数操作都是空间位置查询和删除操作,而插入操作一般都是在初始化室内场景的过程中或者是极少数的新增通行空间的场景中(如引入消防云梯这种较为罕见的

场景),所以引入 Hilbert 曲线的 R\* 树在查询操作上的优势能够弥补其在插入操作上的劣势。此外,针对 Hilbert 码的生成优化算法也一直在进步,引入 Hilbert 曲线对于 R\* 树插入操作的负面影响也会得到有效遏制。总体来看,引入 Hilbert 曲线对于 R\* 树这类空间索引利大于弊。

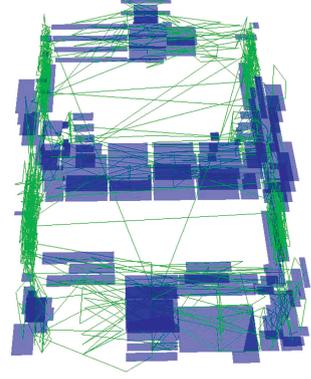


图 7 依照 Hilbert 码排序的实验建筑的 R\* 树遍历曲线展示  
Fig.7 Demonstration of Traversing Lines Sorted by Hilbert Code for Nodes in R\* Tree for Experiment Building

表 2 引入 Hilbert 曲线编码对于 R\* 树的 10 000 次关键空间操作的效果展示表

Tab.2 Time Cost for Introducing Hilbert Curve to R\* Tree on Spatial Operations

对比项目	Hilbert R* 树索引/s	R* 树索引/s	Hilbert 引入效果/%
全树遍历	4.236 207	7.477 665	-43.34
查询	4.073 165	7.706 982	-47.15
删除	0.049 924	0.171 622	-70.91
插入	3.723 421	0.052 240	+7 027.53

## 3 结 语

因为 Hilbert 曲线具有针对遍历空间对象的良好空间局部性的特点,所以引入该曲线能够提高 R\* 树针对空间邻近对象的相关操作效率,即可以显著提升针对全树的对象遍历、查询和删除操作效率。虽然在引入 Hilbert 曲线后,由于生成 Hilbert 码的复杂运算的影响会导致对象插入效率的下降,但是在进行针对 Hilbert 码的生成优化之后,可以降低这种负面影响。未来的研究方向有两个:

1) 针对多级索引的 Hilbert 码动态扩展,可以满足针对更加精确坐标和基本单元扩展的 Hilbert 编码扩展需求。

2) 以降低运算复杂度为目的的 Hilbert 算法

的精简和优化,能够在运算时间受限的情况下快速得到可接受精度的 Hilbert 编码。

### 参 考 文 献

- [1] Chen H L, Chang Y I. All-Nearest-Neighbors Finding Based on the Hilbert Curve [J]. *Expert Systems with Applications*, 2011, 38(6): 7 462-7 475
- [2] Halder S, Ghosal A. A Survey on Mobility-Assisted Localization Techniques in Wireless Sensor Networks [J]. *Journal of Network and Computer Applications*, 2016, 60:82-94
- [3] Boukerche A, Oliveira H A, Nakamura E F, et al. Localization Systems for Wireless Sensor Networks [J]. *IEEE Wireless Communications*, 2007, 14(6): 6-12
- [4] Patwari N, Ash J N, Kyperountas S, et al. Locating the Nodes: Cooperative Localization in Wireless Sensor Networks [J]. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2005, 22(4): 54-69
- [5] Zhou Baoding, Li Qingquan, Mao Qingzhou, et al. User Activity Awareness Assisted Indoor Pedestrian Localization[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2014, 39(6): 719-723 (周宝定, 李清泉, 毛庆洲, 等. 用户行为感知辅助的室内行人定位 [J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2014, 39(6): 719-723)
- [6] Mahmassani H S, Saberi M. Urban Network Gridlock: Theory, Characteristics, and Dynamics [J]. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 2013, 80:79-98
- [7] Zhai Weixin, Cheng Chengqi, Tong Xiaochong, et al. R-tree Index Model of the Earth-Based Three-Dimensional Subdivision Grids[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2016, 41(4): 443-449 (翟卫欣, 程承旗, 童晓冲, 等. 利用地球立体剖分格网生成 Subdivision R-树索引模型 [J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2016, 41(4): 443-449)
- [8] Lin Weiling. Indoor Path Planning Algorithm Based on Navigation Mesh[J]. *Science of Surveying & Mapping*, 2016, 41(2): 39-43(林巍凌. 引入导航网格的室内路径规划算法 [J]. 测绘科学, 2016, 41(2): 39-43)
- [9] Yang Kai, Guo Ying, Bi Jingxue. Indoor Real-Time Positioning Based on Android Platform [J]. *Science of Surveying & Mapping*, 2015, 40(6): 125-128 (杨凯, 郭英, 毕京学. 基于安卓平台的室内实时定位 [J]. 测绘科学, 2015, 40(6): 125-128)
- [10] Zhu Qing, Hu Mingyuan, Xu Weiping, et al. 3D Building Information Model for Facilitating Dynamic Analysis of Indoor Fire Emergency[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2014, 39(7): 762-766 (朱庆, 胡明远, 许伟平, 等. 面向火灾动态疏散的三维建筑信息模型 [J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2014, 39(7): 762-766)
- [11] Seitz J, Vaupel T, Thielecke J. A Particle Filter for WiFi Azimuth and Position Tracking with Pedestrian Dead Reckoning[C]. Workshop on the Sensor Data Fusion: Trends, Solutions, Applications, Bonn, Germany, 2013
- [12] Zhu Q, Gong J, Zhang Y. An Efficient 3D R-tree Spatial Index Method for Virtual Geographic Environments [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2007, 62(3): 217-224
- [13] He Z, Wu C, Wang C. Clustered Sorting R-Tree: An Index for Multi-Dimensional Spatial Objects[C]. The Fourth International Conference on Natural Computation, Ji'nan, China, 2008
- [14] Jensen C S, Lu H, Yang B. Indexing the Trajectories of Moving Objects in Symbolic Indoor Space [M]. Aalborg, Denmark: Springer, 2009
- [15] Xiao Q Z, Yuan M F. A Spatial Indexing Approach Based on Linear Referencing System[C]. Geoinformatics 2006, Wuhan, China, 2006
- [16] Dai Jing, Wu Mingguang, Zheng Peibei, et al. An Improved STR-tree Spatial Index Algorithm Based on Hilbert-Curve[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2014, 39(7): 777-781 (戴晶, 吴明光, 郑培蓓, 等. 基于 Hilbert 曲线的 STR 索引改进算法 [J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2014, 39(7): 777-781)
- [17] Gong Jun, Zhu Qing, Zhang Han, et al. An Adaptive Control Method of LODs for 3D Scene Based on R-tree Index[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2011, 40(4): 531-534 (龚俊, 朱庆, 章汉, 等. 基于 R 树索引的三维场景细节层次自适应控制方法 [J]. 测绘学报, 2011, 40(4): 531-534)
- [18] Zhang Mingbo, Lu Feng, Shen Paiwei, et al. The Evolvement and Progress of R-tree Family[J]. *Chinese Journal of Computers*, 2005, 28(3): 289-300 (张明波, 陆锋, 申排伟, 等. R 树家族的演变和发展 [J]. 计算机学报, 2005, 28(3): 289-300)
- [19] Tak S, Cockburn A. Enhanced Spatial Stability with Hilbert and Moore Treemaps[J]. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 2013, 19(1): 141-148
- [20] Goetz M. Towards Generating Highly Detailed 3D CityGML Models from OpenStreetMap [J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 2013, 27(5): 845-865
- [21] Li Chenyang, Duan Xiongwen, Feng Yucai. Algo-

- rithm for Generating  $N$ -dimensional Hilbert Curve [J]. *Journal of Image & Graphics*, 2006, 11(8): 1 068-1 075 (李晨阳, 段雄文, 冯玉才.  $N$  维 Hilbert 曲线生成算法 [J]. 中国图象图形学报, 2006, 11(8): 1 068-1 075)
- [22] Kamel I, Faloutsos C. Hilbert R-tree: An Improved R-tree Using Fractals[C]. The 20th VLDB Conference, Santiago, Chile, 1993
- [23] Zhang Zongpei, Wan Gang, Cao Xuefeng, et al. Lunar Shell Space Solid Grid Technology[J]. *Journal of Geomatics Science and Technology*, 2015, 32(1): 101-105 (张宗佩, 万刚, 曹雪峰, 等. 月球圈层空间立体网格技术研究 [J]. 测绘科学技术学报, 2015, 32(1): 101-105)
- [24] Xu Hongbo, Hao Zhongxiao. Grid-Partition Clustering Algorithm Based on Hilbert Curve[J]. *Journal of Chinese Computer Systems*, 2010, 10: 1 979-1 983 (徐红波, 郝忠孝. 一种采用 Hilbert 曲线网格划分聚类算法 [J]. 小型微型计算机系统, 2010, 10: 1 979-1 983)
- [25] Zhou Yuke, Zhou Chenghu, Gao Xizhang. Parallel Map Overlay Union Method via Hilbert Spatial Sort Decomposition[J]. *Geography and Geo-Information Science*, 2013, 29(6): 18-21 (周玉科, 周成虎, 高锡章. 基于 Hilbert 空间排序分解的并行叠加联合方法研究 [J]. 地理与地理信息科学, 2013, 29(6): 18-21)

## A Hilbert-Curve-Based R\* Tree Index Optimized for Indoor Evacuation

NIU Lei<sup>1</sup> SONG Yiquan<sup>2</sup> ZHANG Hongmin<sup>1</sup> HOU Shaoyang<sup>1</sup>

1 School of Surveying and Urban Spatial Information, Henan University of Urban Construction, Pingdingshan 467036, China

2 School of Geographic and Environmental Sciences, Tianjin Normal University, Tianjin 300387, China

**Abstract:** The location-based service requires fast query, insertion and deletion operations for research objects, and this demand is augmented for the indoor evacuation fields. Thus, introducing spatial index to tackle the operation efficiency problem is strongly demanded for indoor related scenes, and this method is sounding for indoor spatial objects. Nevertheless, this solution always meets a performance bottleneck. And this performance bottleneck of spatial index pervasively exists in the current compact indoor application scenes. To mitigate this problem, this paper tries to combine the R\* tree index with the Hilbert curve, and proposes an innovative Hilbert curve based index. The succeeding experiment is designed to compare the performance of proposed index with the classic R\* index. The test result shows the new index has successfully alleviated the execution efficiency for multi-type spatial operations, especially on critic indicators of spatial index performance.

**Key words:** indoor position; evacuation; Hilbert curve; R\* tree

**First author:** NIU Lei, PhD, associate professor, specializes in 3D GIS, indoor modelling and evacuation research. E-mail: niuneilneo@vip.163.com

**Foundation support:** The National Natural Science Foundation of China, Nos. 41771433, 41501440, 41571387, 41701454; the Key Research Program of Henan Higher Education, No. 15A170002; the Foundation of Henan Science and Technology, No. 152102310321; the 2015 Technology Leadership Foundation of Henan University of Urban Construction; the 2014 Talent Young Teacher Foundation of Henan University of Urban Construction; the Tianjin Science and Technology Planning Project, No. 15ZCZDSF00390.