

Hierarchical Modeling of Indoor and Outdoor Road Network Based on Spatial Cognition

Xingfeng Wang

School of Environmental Science and Spatial Informatics, China University of Mining and Technology, Xuzhou Jiangsu

Email: xzwind@cumt.edu.cn

Received: Apr. 12th, 2018; accepted: Apr. 21st, 2018; published: Apr. 28th, 2018

Abstract

With the development of indoor and outdoor positioning technology, the integration and application of indoor and outdoor location information has become one of the hot spots in GIS research. In view of integrated wayfinding of the indoor and outdoor space, this paper takes the indoor and outdoor road network as the research object. On the basis of the analyses of the functions and types of indoor units and their spatial relationships, a novel indoor and outdoor network hierarchical model (IONHM) based on spatial cognitive level has been put forward. Indoor and outdoor road network is summarized into four basic levels: street level, building level, floor level and the block level. On the basis of the characteristic of analysis of different levels, the paper realizes the topological road network of different levels based on database technology. Taking the road network of an indoor and outdoor as an example, four levels of road network structure were constructed, and the feasibility and validity of the proposed model were verified by the calculation of the wayfinding. The experimental result indicated that IONHM model fits the way of the cognition of science for people. IONHM can describe the characteristics of the network of different levels, enable the integrated wayfinding of indoor and outdoor space, and meet the demand of the precision and efficiency of pathfinding. Results from this study provide important basis for indoor and outdoor navigation.

Keywords

Spatial Cognition, Topological Relationship, Integrated Wayfinding, Location Based Service, Route Network Model

面向室内外一体化寻径的道路网络空间感知层次建模方法

王行风

中国矿业大学环境测绘学院, 江苏 徐州
Email: xzwind@cumt.edu.cn

收稿日期: 2018年4月12日; 录用日期: 2018年4月21日; 发布日期: 2018年4月28日

摘要

随着室内外定位技术的发展, 室内外位置信息的融合与统一应用, 成为GIS研究的热点。本文针对室内外统一寻径的这一现实问题, 以室内外空间路网作为研究对象, 在分析室内空间区域功能, 明确室内单元类型的基础上, 基于空间感知规律, 构建了室内外道路网络感知分层模型, 将室内外路网简化为街道、建筑物、楼层和区块四个层次路网, 并分析了各层次路网的特点, 以及基于数据库的各层次路网拓扑关系存储和表达。以某单位室内外路网作为分析对象, 构建了四个层次的路网结构, 并通过寻径计算验证了所提出模型的可行性和有效性。结果表明, 该分层模型符合人们对室内外路网的经验性层次认知, 能够很好地刻画路网层次特征, 能满足室内外一体化寻径计算的精度和效率的要求, 为室内外导航应用奠定了基础。

关键词

空间感知, 拓扑关系, 一体化寻径, 位置服务, 路网模型

Copyright © 2018 by author and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着国家城市化的快速发展, 室内空间应用规模大幅增加, 人员在大型场馆的活动日益增多。基于大型场馆的应急救援与寻径导航亟需室内外 GIS 共同参与以提供全新的技术支持, 室内外路网构建已成为室内外位置信息融合应用的重要课题[1] [2] [3] [4] [5]。道路导航是室外 GIS 研究较多且应用较为成熟的领域, 室内路网构建也多直接借鉴室外 GIS 的相关研究成果[6]。如 Kwan 利用最短路径算法为在建筑物内由于突发事件而受困的人员寻找最佳的疏散路径[7]; Lee 等在考虑室内单元逻辑关系的基础上, 利用直中轴变化来获取室内网络模型并将其用于三维空间中最短路径分析[8] [9]; Chen 等在分析室内 3D 特征的基础上, 构建了 GNM (Geometric Network Model)模型[10]; Mandloi 等则提出了一个整合室内环境及室外交通网络的三维空间模型用于路径导航分析[11]; 此外 Hong S、Zlatanova S [12] [13]以及李渊[14]等也做了类似的研究。也有部分学者从环境认知的角度出发, 利用空间句法理论构建了室内空间模型[5] [15] [16] [17]。但这些模型多局限于理论方面的探讨, 分析精度难以满足实际需求, 有些尚缺乏切实有效的建模方法支撑。因此, 基于空间认知规律, 综合考虑和概括室内外路网结构和特征, 构建能够准确表达室内外路网拓扑关系的模型, 实现一体化寻径就成为了室内外路径导航分析应用的关键。

2. 基于感知尺度的室内外一体化道路网络层次模型

2.1. 室内外路网拓扑模型

室内空间单元的划分是路网模型构建的基础工作, 文献[18]根据室内单元之间的沟通和联系将室内

空间划分为功能性单元和联系性单元, 本文借鉴这种划分方法, 并基于节点—弧段模型, 将室内空间转换成由弧段元素和结点元素组成的通道网络模型。

2.1.1. 点元素

点元素用来表达通道网络上的结点, 如建筑物出入口、电梯出入口以及楼道拐弯处等。根据空间单元的划分以及基于空间层次感知原理。将功能性单元简化为功能性节点, 并按所处的层次, 功能性节点可以分为: ①建筑物单元节点。代表整个建筑物, 是和室外道路网络联系的顶层节点。②楼层单元节点。建筑物在垂直方向的划分, 表达的是楼层, 具有多个出入口, 内部由各种水平通道联系。③区块单元节点。同一水平楼层中按照功能的不同所划分的区域, 区块和区块之间有通道联系。④房间单元节点。房间节点为叶子节点, 是终端单元, 其特点是除了通过门廊和外部相联系之外, 并无其它联系方式。

2.1.2. 弧段元素

室内空间联系性单元可简化为弧段, 根据弧段沟通联系的方向可分为水平联系弧段和垂直联系弧段^[19]。水平联系性单元和垂直联系弧段紧密联系构成了室内通道网络。在实际应用中, 可根据联通关系的复杂性、寻径目标的层次性, 借鉴分层次认知的思想, 构建等级不同的通道网络。

2.2. 室内外一体化道路网络层次模型

为了实现室内外导航一体化寻径的目的。本文面向室内外导航无缝切换的要求, 基于室内空间认知规律^[20], 从应用和显示的角度将室内外路网结构概括为街道级(Street Level)—建筑物级(Building Level)—楼层级(Floor Level)—区块级(Block Level)四个认知阶段的网络, 从而构成了多层次、多尺度表达的室内外道路网络感知层次模型(IONHM, Indoor and Outdoor Network Hierarchical Model based on Cognition)。各个认知阶段(层次)的路网特点为:

1) 街道级路网特征(Street Level Network: Street-Building)。属于室内外路网结构的认知, 感知区域室外路网的形状特征, 表达了街道级别的路网基本轮廓。在该级别中, 各个建筑物可作为道路网络中的一个节点来表达。

2) 建筑物级路网(Building Level Network; Building-Floor)。单个建筑物作为感知对象, 楼层之间的联系通道首先被感知, 形成建筑物楼层之间关系的认知。在该层次中, 建筑物由不同楼层组成, 楼层之间通过垂直路径(如楼梯、电梯等)相连。通过该层次的路网, 可以明确到达各个楼层的路径。

3) 楼层级路网(Floor Level Network; Floor-Block 层)。感知对象为单个楼层, 实际应用中可以根据楼层区域的复杂情况对室内空间以及实体对象进行简化、关联及综合加工以实现分区, 分区之间构成连通子图, 路网和拓扑信息变得逐渐完善。

4) 区块级路网(Block Level Network-Block-Cell)。认知层次最深, 在该层次中, 每个室内空单元被分配至不同的联系单元, 通过联系单元与楼层联系, 再通过楼层之间的垂直通道(电梯或者楼梯)与室外道路相联系, 路网图形与真实路网已经完全逼近, 从而形成了对室内外路网的精细化表达。

2.3. 室内外拓扑关系表达和存储

室内外路网要素的拓扑关系可利用数据库来存储和表达^[20]。对于分层网络来说, 节点和弧段之间的拓扑关系除了室外道路网络的关联、邻接和包含等拓扑关系之外, 还包括结点元素之间的层次关系, 下面结合试验区域(图 1)进行介绍。

2.3.1. Street—Building 层网络

该层次在室外路网的基础上增加各建筑物的出入口信息, 从而可以利用寻径算法计算室内某点到建

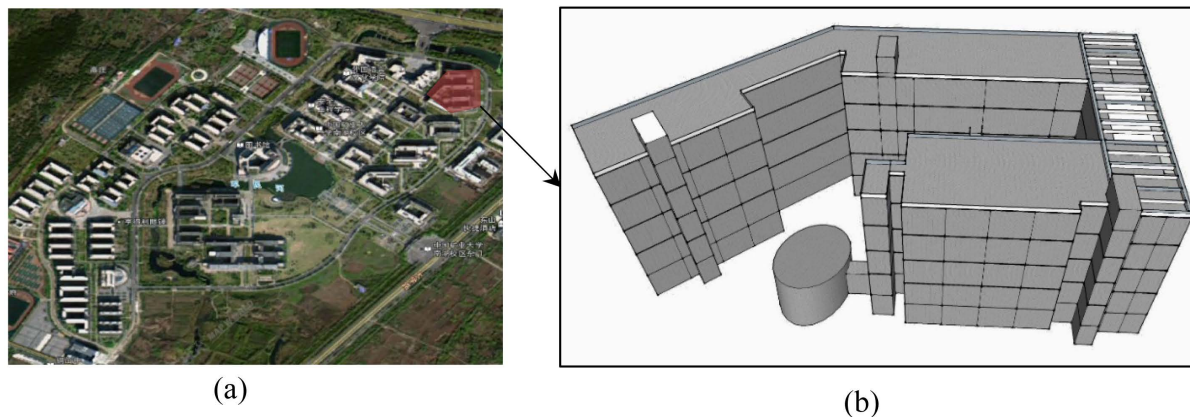


Figure 1. Study Area
图 1. 研究区域

建筑物的各出入口节点的路径信息。拓扑关系表达包括：1) 建筑节点表。建筑物简化为室外网络中的一个节点，如表 1。其中 Geometry 表达建筑物的中心坐标，因为是最顶层，父节点(Parent-Node-ID)设置为 NULL；2) 建筑物出入口节点表。存储建筑物的出入口节点信息，在应用中，需将这些点分配到街道网络中，如表 2。

2.3.2. Building-Floor 层感知层网络

该层次网络表达的是楼层之间的联系，因此需要存储垂直方向弧段的信息。拓扑关系包括：1) 楼层信息表。如表 3，用节点来表达建筑物各楼层的信息，Parent-Node-ID 存储的是 Building ID；2) 垂直弧段-节点关系表。表达的是电梯或楼层弧段与各楼层的交点(出入口)信息，如表 4。Node-ID-Set 是指构成该弧段的节点集合，Type 表达弧段的类型，0-电梯弧段；1-楼梯弧段；Active 表达该垂直弧段的当前状况，True 表示该弧段正常通行，False 表示该弧段障碍，不可以通行；3) 节点信息表。存储了电梯/楼梯节点的详细信息。Type 表达节点信息的类型，0-出入口点，1-电梯点，2-楼梯点。Floor Number 表达的是该节点所在的楼层；Active 表示该节点的活动状态，是否禁止通行或者停靠。如表 5。

2.3.3. Floor-Block 层感知层网络

该层次网络表达楼层内不同部分(区块)之间的联系。水平楼层可以根据楼层的复杂程度划分为多个区块，如果楼层比较简单，也可以不进行区块的划分。Floor-Block 表达水平楼层内各个 block 之间的连通。存储的区块信息如表 6，区块联系弧段信息如表 7。其中 Direction 表示联系的方向是单向还是双向。

2.3.4. Block-Room Cell 层感知层网络

存储各区块所包含的房间以及区块内的节点连通状况。1) 区块-弧段表。表达一个 Block 所包含的弧段，一个 Block 可以包括一个或多个走廊弧段，如表 8 所示。2) 弧段-节点信息表。表达弧段由哪些节点所组成。节点主要包括走廊弧段起始点、交点以及弧段之间的汇聚点等，如表 9。3) 房间关联区块表。就是将室内房间分配到房间所在 block，如表 10。

3. 研究区域

为了说明 IONHM 层级树状网络的特点，这里选择某单位道路网络以某部门行政大楼(CESI)为例进行说明。大楼共分 5 层，每层共分为 A、B 和 C 共 3 个区域，一共有 1 台电梯和 4 部楼梯。图 1(a)为大楼所处区域室外道路网络概况，图 1(b)为大楼的整体外貌。

Table 1. Nodes of Building**表1.** 建筑物节点表

Building ID	Name	Geometry	Parent-Node-ID
A	CESI	...	NULL
B	OFFICE	...	NULL
...

Table 2. Entrance and exit nodes of Building**表2.** 建筑物出入口节点表

Entrance ID	Building ID	Geometry	Reserve
1	CESI	...	NULL
2	CESI	...	NULL
...

Table 3. Floor information**表3.** 楼层信息

Floor ID	Name	Geometry	Parent-Node-ID
F1	第一层	...	CESI
F4	第四层	...	CESI
...

Table 4. Vertical arc-node**表4.** 垂直弧段-节点表

VCC ID	Type	Active	Node-ID-Set
V1	0	True	1,2,3,4,5
V2	1	True	...
...

基于 IONHM 层级树状网络模型的特点,将该单位的路网以及 CESI 建筑物的室内路网进行认知分层和简化,概括为街道级—建筑物级—楼层级—区块级四个认知阶段的网络。图 2(a)为街道级路网特征,在该级别中,各个建筑物被抽象为节点对象,并关联到原有路网上,如图 2(a)中的 CESI 建筑物抽象为道路网络中的一个结点。图 2(b)中表达的为建筑物级路网,其中的 CESI 大楼由 5 个楼层组成,楼层之间的包括 5 个垂直方向的通道。图中的点为道路与楼层的节点(例如楼层出入口),弧段表达了楼层之间的联系通道。图 2(c)为 CESI 大楼四楼楼层的区块分布,四楼楼层被划分为(a)、(b)和(c)三个区域,图 2(d)为连通子图,其中“ Δ ”表达的是楼层之间的连接结点,“ \times ”表示的是区块之间的连通结点。

图 3 为 CESI 大楼四楼的区块级内部网络,图 3(a)为四楼室内单元的分布情况,3(b)为相应的网络图。

按照前述思路进行,最后得到 IONHM 分层路网,路网各层次的具体数据如表 11 所示。

寻径测试

为验证以上所构建的分层网络适用性,这里也将点—弧段模型引入室内空间(结点代表房间和出口,弧段代表通道等),以进行对比,所构造的通道网络如图 4 所示。路网数据中节点数为 1865,弧段数 632。

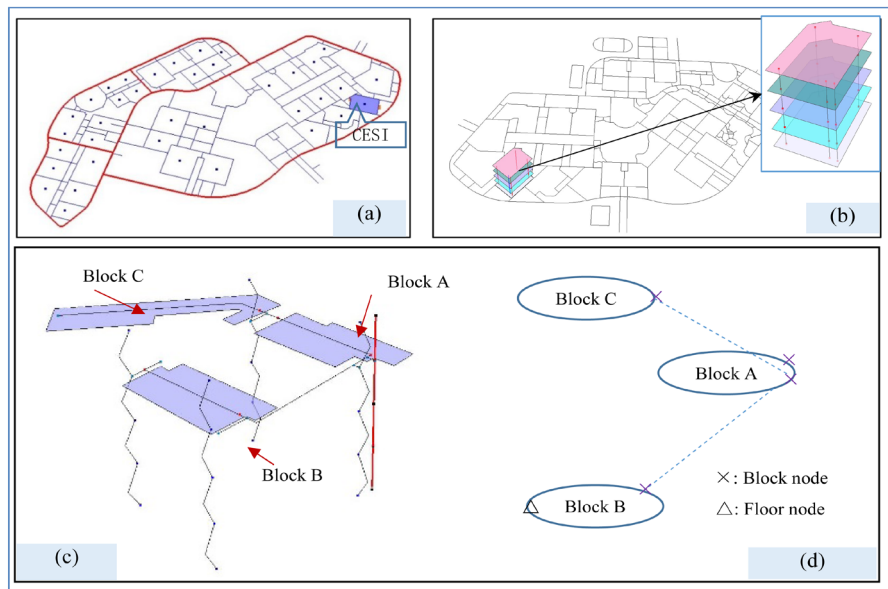


Figure 2. Street, building and floor level road network
图 2. 街道级、楼层级和楼层级路网

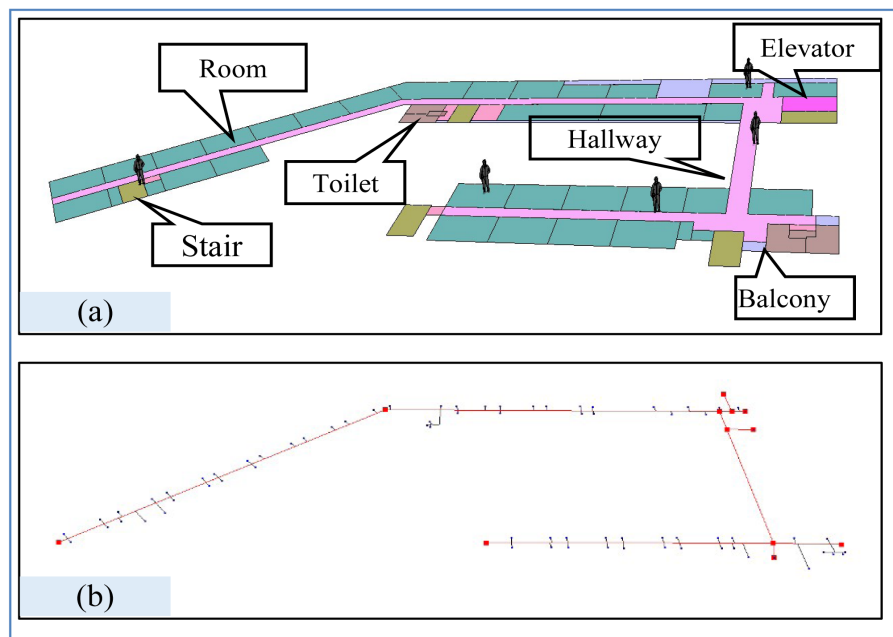


Figure 3. Block level road network
图 3. 区块级路网

采用上述两种不同的室内网络模型，以人正常的步速，利用 Dijkstra 算法计算用户从房间 B408 房间到 1 楼各出口的最短距离和所需的时间，以及采用两种不同的路网模型计算最短路径的寻径时间如表 12 所示。图 5 为所计算的从 B408 到 1 楼出口的走电梯和楼梯的路径以及所需的最短时间(注：电梯路径不包括电梯等待时间)。Dijkstra 算法的时间复杂度是 $O(n^2)$ ，采用传统的点-弧段模型，由于所有的节点都需要参与运算，B408 到 1 楼到各个出口的运算时间约为 300 ms。但利用 IONHM 分层模型，通过空间感知所进行的层次划分，每一个层次都可以大量减少参与运算的节点数，简化了计算网络，从而大大提高了运算

Table 5. Node information**表5.** 节点信息表

Node ID	Type	Active	Geometry	Floor Number
1	0	True	x1,y1,z1	1
2	1	True	x2,y2,z2	2
...

Table 6. Block Floor Information**表6.** 楼层区块信息表

Block ID	Name	Geometry	Floor Number
A	Block A	NULL	F4
B	Block B	NULL	F4
...

Table 7. Arc-Node of block**表7.** 区块弧段-节点表

Block Arc	From Node	End Node	Direction	Floor Number
A	A	B	1	4
B	C	A	1	4
C	B	C	1	4
...

Table 8. Block-Arc**表8.** 区块-弧段

Block Arc	Arc ID	Floor Number
A	A	4
B	C	4
C	B	4
...

的效率,因此计算 B408 到各个出口的最短路径的运算时间都较少,约为 10 ms 左右。虽然本实例中 CESI 大楼的楼层数较少,节点也不多,但实际上即使建筑物楼层数较多,通多分层处理,每次参与运算的点数也不会特别多,因此,IONHM 模型不仅方便管理,而且对于室内外的一体化寻径具有较优的时间开销,能够获得较好的性能。

4. 结语

本文针对室内外统一寻径的这一现实问题,基于空间感知认知规律,构建了室内外道路网络感知分层模型,并以某单位行政大楼作为分析对象,实现了 IONHM 路网模型,基于该路网模型的模型构建以及路径计算表明:该分层模型符合人对室内外道路网络的经验性层次认知,能够很好地刻画路网的层次

Table 9. Arc-Node Information
表9. 走廊弧段-节点关系表

HCC ID	Active	Direction	Node_ID_Set
HCC1	True	1	101,102, ...,104
HCC2	True	1	C
HCC3	False	1	B
...

Table 10. Room-Arc relationship
表10. 房间-关联弧段表

Cell ID	Block ID	Active	Name
101	A	True	B408
102	B	True	A401
201	C	True	C201
...

Table 11. Levels of Network of building
表11. 某building分层路网数据

路网层次	节点数	弧段数	说明
Street-building	5	5	和室外街道路网相连的出入口
Building-floor	26	20	电梯弧段、楼梯弧段
Floor-block	24	10	建筑物的第四层的分区(A、B、C)
Block-room	122	36	第四层 A 区各个房间节点、弧段起止点、交叉点等

Table 12. Distance, Time and Calculate times of pathfinding
表12. 路径距离、时间和计算时间

Exit	Distance (meter)	Time (minute)	寻径时间(wayfinding time, ms)	
			Node-arc	CLNM model
Stair 1	102.2	1.42.03	312	15
Stair 2	152.6	2.21.52	310	16
Stair 3	130.0	1.52.20	322	12
Stair 4	148.4	2.10.11	332	15
Elevator	60.3	1.02.03	298	10

特征,能有效缩短寻径计算的时间。进一步分析表明,即使在节点数和弧段大幅增加的前提下,寻径时间也不会耗费太多。因此该模型能够支持室内外统一寻径的问题,对于室内外的融合应用,例如室内空间应急疏散的寻径等问题,可以给出较为快速和合适的选择,为有关部门在规划或救灾中提供决策支持。

作为室内外位置信息融合应用的研究热点,面向室内外一体化寻径导航尚有很多问题有待进一步研究。本文 IONHM 模型构建,如结点、通道以及分层网络的实现目前只能通过手工或半手工创建,效率低下。因此,如何根据室内拓扑空间的构成,以及室内空间区域的功能,改进室内空间各区块的子网优

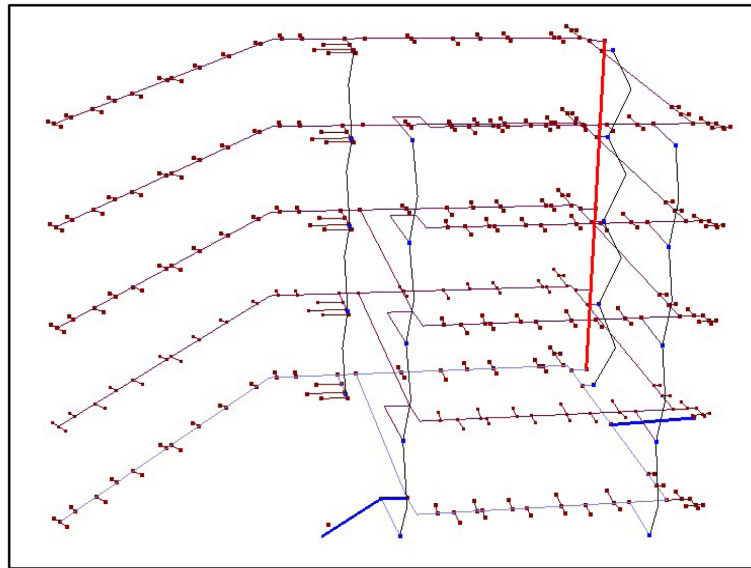


Figure 4. Road Network of Node-Arc

图 4. 节点-弧段路网

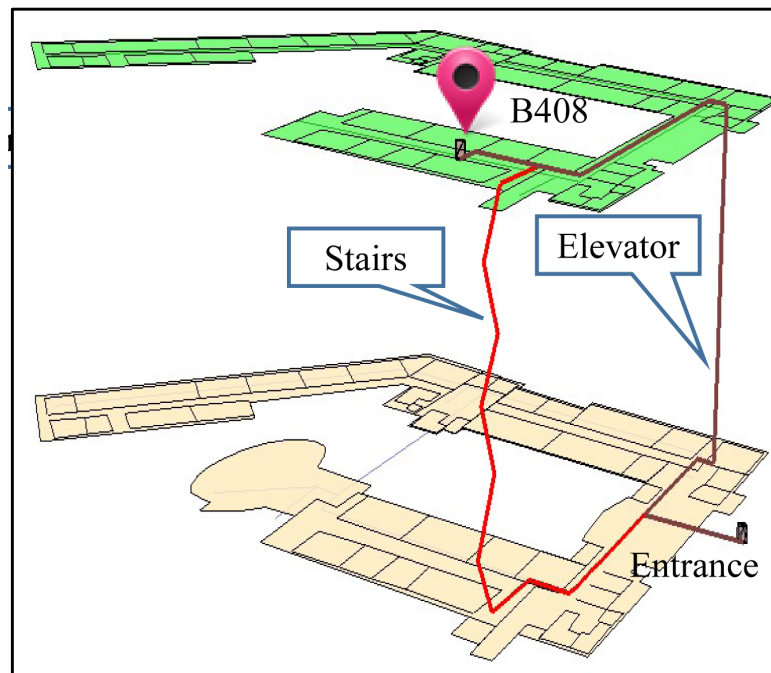


Figure 5. Floor Level Network

图 5. 楼层级路网

化划分策略,设计自动的分割算法,自动构建各层次的路网拓扑结构图[21],取代目前的人工方法以提高IONHM 分层网络的构建策略,是下一步继续研究的方向。

基金项目

“十三五”国家重点研发计划(室内混合智能定位与室内 GIS 技术)(2016YFB0502104-3)。

参考文献

- [1] 李德仁, 刘强, 朱庆. 数码城市 GIS 中建筑物室外与室内三维一体化表示与漫游[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2003, 28(3): 253-258.
- [2] Nossum, A.S. (2011) Indoor Tubes—A Novel Design for Indoor Maps. *Cartography and Geographic Information Science*, **38**, 193-201. <https://doi.org/10.1559/15230406382192>
- [3] Morboys, M. (2011) Modeling Indoor Space. *Proceedings of the 3rd ACM SIGSPATIAL International Workshop on Indoor Spatial Awareness*, Chicago, 1 November 2011, 1-6.
- [4] Salvessonsum, A. (2011) Indoor Tubes—A Novel Design for Indoor Maps. *American Cartographer*, **38**, 192-200. <https://doi.org/10.1559/15230406382192>
- [5] Gilliéron, P.Y. and Merminod, B. (2003) Personal Navigation System for Indoor Applications. *11th IAIN World Congress*, Berlin, 21-24 October 2003, 21-24.
- [6] Coors, V. (2003) 3D-GIS in Networking Environments. *Computers Environment & Urban Systems*, **27**, 345-357. [https://doi.org/10.1016/S0198-9715\(02\)00035-2](https://doi.org/10.1016/S0198-9715(02)00035-2)
- [7] Kwan, M.P. and Lee, J. (2005) Emergency Response after 9/11: The Potential of Real-Time 3D GIS for Quick Emergency Response in Micro-Spatial Environments. *Computers Environment & Urban Systems*, **29**, 93-113. <https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2003.08.002>
- [8] Lee, J. and Kwan, M.-P. (2005) A Combinatorial Data Model for Representing Topological Relations among 3D Geographical Features in Micro-Spatial Environments. *International Journal of Geographical Information Science*, **19**, 1039-1056. <https://doi.org/10.1080/13658810500399043>
- [9] Li, X., Zhang, X. and Tan, L. (2007) Assisting Video Surveillance in Micro-Spatial Environments with a GIS Approach. *Proceedings of SPIE—The International Society for Optical Engineering*, **6754**, Article ID: 675402. <https://doi.org/10.1117/12.764565>
- [10] Chen, L.C., Wu, C.H., Shen, T.S., et al. (2014) The Application of Geometric Network Models and Building Information Models in Geospatial Environments for Fire-Fighting Simulations. *Computers Environment & Urban Systems*, **45**, 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2014.01.003>
- [11] Thill, J.C., Dao, T.H.D. and Zhou, Y. (2011) Traveling in the Three-Dimensional City: Applications in Route Planning, Accessibility Assessment, Location Analysis and Beyond. *Journal of Transport Geography*, **19**, 405-421. <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2010.11.007>
- [12] Hong, S., Jung, J., Kim, S., et al. (2015) Semi-Automated Approach to Indoor Mapping for 3D As-Built Building Information Modeling. *Computers Environment & Urban Systems*, **51**, 34-46. <https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2015.01.005>
- [13] Pu, S. and Zlatanova, S. (2005) Evacuation Route Calculation of inner Buildings. In: *Geo-Information for Disaster Management*, Springer Verlag, Heidelberg, 1143-1161.
- [14] 李渊. 基于语义信息的建筑尺度多模式应急路径诱导方法[J]. 华中建筑, 2007, 25(3): 109-111.
- [15] Golledge, R.G. (1993) Geographical Perspectives on Spatial Cognition. *Advances in Psychology*, **96**, 16-46.
- [16] Ratti, C. (2004) Space Syntax: Some Inconsistencies. *Environment & Planning B Planning & Design*, **31**, 487-499. <https://doi.org/10.1068/b3019>
- [17] Franz, G., Heyde, M.V.D. and Bühlhoff, H.H. (2005) Predicting Experiential Qualities of Architecture by Its Spatial Properties. *Bob Martens*, **2005**, 157-166.
- [18] 王行风, 汪云甲. 一种顾及拓扑关系的室内三维模型组织和调度方法[J]. 武汉大学学报信息科学版, 2017, 42(1): 35-42.
- [19] Arens, C., Stoter, J. and Oosterom, P.V. (2005) Modelling 3D Spatial Objects in a Geo-DBMS using a 3D Primitive. *Computers & Geosciences*, **31**, 165-177. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2004.05.013>
- [20] 唐炉亮, 刘章, 杨雪, 等. 符合认知规律的时空轨迹融合与路网生成方法[J]. 测绘学报, 2015, 44(11): 1271-1276.
- [21] Luo, F., Cao, G. and Li, X. (2014) An Interactive Approach for Deriving Geometric Network Models in 3D Indoor Environments. In: *ACM Sigspatial International Workshop on Indoor Spatial Awareness*, ACM, New York, 9-16.

知网检索的两种方式：

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择：[ISSN]，输入期刊 ISSN：2329-549X，即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入，输入文章标题，即可查询

投稿请点击：<http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱：gst@hanspub.org