

基于数字孪生的室内空间路径规划方法

陈新中¹ 李敬雯¹

CHEN Xinzong LI Jingwen

摘要

随着室内空间领域的不断拓展,面向位置服务的应用场景呈现出愈发多样化的态势。就室内空间位置服务而言,其核心关键在于如何以高效的方式进行室内空间路径规划,以满足日益增长的室内位置服务需求与提升服务质量,基于此,为进一步提升室内空间路径规划的准确性和适用性,对室内空间进行建模至关重要,文章提出了一种基于数字孪生的室内空间路径规划方法,采用“虚拟层-交互层-物理层”的分层架构在室内空间环境下进行建模,构建虚拟路径实体模型和物理路径实体模型,实现对室内空间路径规划的精确模拟和仿真优化,实验结果表明,模型在实际应用中具有较好效益。

关键词

室内空间; 数字孪生; 分层模型; 路径规划; Dijkstra 算法

doi: 10.3969/j.issn.1672-9528.2024.12.040

0 引言

日常工作和生活中产生了大量室内空间数据,如何利用这些数据解决室内空间路径规划问题是当前研究的重点。室内空间路径规划的目的是解决室内空间下各个移动对象的路径规划问题,其核心在于使机器计算得到的路径规划结果和人工实际选择最优路径的相似程度更接近,以便利快捷的机器计算代替繁琐的人工选择。考虑到在室内空间中,存在多种环境要素和复杂结构,室内路径规划的最优解不一定是最短路径,在多种环境约束的条件下,可能是其他更具有实际意义的路径方案。因此,考虑采用数字孪生技术来提高室内空间路径规划的准确性和适用性,通过虚拟仿真模拟室内空间,来实现精准的室内空间路径规划。数字孪生技术是当下新兴的一项智能仿真技术,通过虚实空间交互实现对真实环境的仿真模拟,已广泛应用于多个领域,如城市管理、汽车制造、轨道交通等。利用数字孪生技术模拟真实环境,监控真实环境的物理变化,模拟真实环境的物理行为,评估真实环境的物理状态,预测真实环境的发展趋势^[1]。针对以上分析的情况,本文提出一个基于数字孪生的室内空间路径规划模型,通过建立“虚拟层-交互层-物理层”的分层架构,模拟室内空间结构,构建室内空间下的虚拟路径实体模型和物理路径实体模型,利用模型计算优化路径规划结果,实现对室内空间路径规划的精确模拟和仿真优化。同时,提出一个多维模型量化评估准则,从可用性、融合性、实用性3个方面,计算对应的量化公式,对模型进行量化评估,通过量化评估实例证明模型在实际应用中具有较好效益。

1 国内外研究现状

1.1 数字孪生技术研究现状

数字孪生技术被誉为有望改变智能制造行业游戏规则的新兴技术,采用数据反馈来映射物理实体,对多个行业产生了颠覆性影响。2003年,数字孪生的概念已经出现,密歇根大学教授Grieves在其授课中提出“物理实体的等价数字化表达”,引入虚拟空间概念^[2]。经过一段时间的发展,航天器研制维护研究中率先加入数字孪生的概念,并将数字孪生技术定义为面向飞机或系统,充分利用物理实体模型传感器等设备采集飞行器的各项数据,从而生成模拟过程并记录相应物理状态的技术。随着研究的深入,数字孪生的定义由“面向飞机或系统”逐步扩展为“面向完整建模的系统”,将“映射”扩展到“映射和预测”。Zhuang等人^[3]也给出数字孪生的定义,描述对象是物理实体,主要针对其属性和状态进行重构和数字映射,可用于模拟、诊断、预测和控制产品物理实体在真实环境中的实现过程。

在数字孪生技术的概念被提出之后,众多学者和机构对此展开研究。2011年,国外数据研究相关实验室提出并开发了数字孪生模型,面向未来复杂环境,旨在解决航天器的维护预测问题,并计划在未来交付一种新的航天器模型和一种与实物产品相对应的数字模型。自2014年以来,波音、通用电气等公司陆续开展了一系列关于数字孪生技术的应用研究项目。2015年,通用电气公司引入基于数字孪生各项先进技术,利用云服务平台,开展发动机监控、检查、维护和预测^[4]。

1.2 室内空间建模研究现状

目前,室内空间表示模型大致可分为四类:几何模型、对象模型、符号模型和混合模型^[5]。几何模型侧重于利用几何形式描述室内空间,包括基于边界的网格模型^[6]或矢量模

1. 中国电子科技集团公司第二十八研究所 江苏南京 210000

型^[7]。对象模型主要描述室内空间中不同类型对象的属性、操作和关系。IndoorUML^[8]是一个UML建模模型,根据室内元素的特点,将室内元素划分为:子空间、墙壁、活动元素(门窗)、地板和活动元素等。符号模型是当前室内空间建模中最流行的方法。2005年,Becker等人^[9]提出使用集合形式来表示室内空间的位置信息,方便地使用集合操作来实现范围查询;2008年,Li等人^[10]提出了一种基于拓扑的语义模型,基于室内空间连通性定义了相关强度和 Related 长度的概念,并分析了室内空间拓扑属性。混合模型是指几何模型和符号模型的结合;2010年,Becker等人提出了多层空间事件模型^[11];同年,Li等人^[12]提出了一种基于网格集成几何和拓扑特征的室内空间网格图混合模型。

1.3 室内路径规划研究现状

对室内路径规划现有的研究工作进行概括,文献[6-11]表明,相当多的研究人员使用了Dijkstra、位置感知导航(LARN)、HCTNav、改进a*算法、深度优先算法、D*算法、k-NN算法等在室内空间内导航。其中,Mehta等人^[13]提出了一种适用于终端和移动模块的系统,为用户提供在室内建筑中导航,利用蓝牙技术确定位置,使用Dijkstra算法确定到达目的地的最短路径。Megalingam等人^[14]提出了一种基于方向变化的路径规划算法,将室内空间划分为具有不同的区域,利用位置感知导航(LARN)算法寻找最佳路径。Xu等人^[15]提出了基于Dijkstra算法的路径规划方法,在考虑用户个人偏好的情况下提供了源和目的地之间的最短路径。

2 基于数字孪生的室内空间路径规划方法

2.1 模型构建方法

基于数字孪生的室内空间路径规划方法的核心在于建立基于数字孪生的室内空间路径规划模型,利用数字孪生技术对室内空间实体进行系统化的数字表现,构建模型可为后续理解、预测、优化和控制室内空间提供渠道,因此,模型构建是实现模型驱动的基础。而且,基于数字孪生的室内空间路径规划模型不仅是对基础单元进行建模,还从空间维度上对室内空间各类元素进行组合建模,进而实现对复杂空间对象各领域特征的全面描述。同时,为了保证模型的正确性和有效性,利用所描述物理对象的状态或特征来对组合建模后的模型进行验证,并且通过模型校正使模型更加逼近物理对象的实际运行或使用状态。此外,为便于模型的增加、删除、修改、查询和用户使用等操作以及模型验证或校正信息的使用,模型管理也是必要的。基于以上分析,模型构建理论体系包括模型构建、模型管理、模型验证和模型评估四个方面,如图1所示,

通过多维度的融合交互,最终完成模型的真实实现。

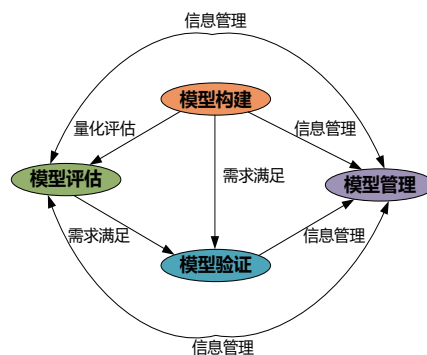


图1 模型构建理论体系

2.2 模型分层架构

数字孪生技术是通过构建物理实体在虚拟空间中的数字孪生体,通过孪生数据驱动显示物理信息的融合,实现对物理实体的数字化管控与优化,而且分层的方式可以清晰地表示出虚拟和现实中的各类信息。因此,对于基于数字孪生的室内空间路径规划模型,考虑采用分层的方式,利用“虚拟层-交互层-物理层”三层结构构建模型,如图2所示。

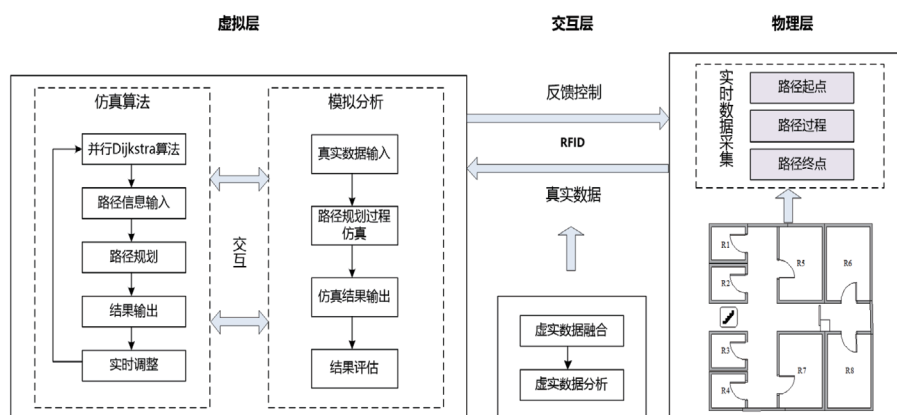


图2 模型分层架构

(1) 虚拟层:虚拟层是本模型的核心,根据物理层提供的实际数据,采用不同的路径规划算法,仿真真实环境,实现路径规划优选以及结果评估,得到最优方案后,通过交互层将结果传递到物理层,为实际路径规划提供决策支撑。

(2) 交互层:交互层是本模型的纽带,通过交互层建立虚拟层和物理层之间的传输桥梁,物理层提供的实际数据和虚拟层提供的优选方案在交互层进行融合和分析,完成模型的交互反馈,实现精准智能决策。

(3) 物理层:物理层是本模型的出入口,利用RFID等传感器,实时采集环境数据,如路径起点、路径过程信息和路径终点等,同时对室内空间结构进行建模,室内空间结构较为复杂,存在墙体、门等障碍物。

2.3 模型构建过程

模型的构建过程主要包括虚拟路径实体模型构建和物理路径实体模型构建。

(1) 虚拟路径实体模型构建。在虚拟层中构建虚拟实体，对室内空间结构的全要素进行实时模拟，对室内空间结构进行全方位描述，生成室内空间的有向加权结构图。虚拟实体能够模拟室内空间区域，描述区域划分和状态，形成对室内空间结构的优化。同时，路径相关的各类信息是虚拟实体的输入，是虚拟实体的数据来源，提供数据属性和数据关系，形成虚拟和现实的双向反馈机制。

- 针对室内空间路径规划中的虚拟路径，做出以下假设：
- ① 顾客倾向于优先使用垂直电梯。
 - ② 顾客的目的店铺大于等于 1 个。
 - ③ 顾客行进路线中要避免拥堵点。

基于以上假设，选择 Dijkstra 并进行改进，形成作为室内空间路径规划的基础算法，具体算法如下。

算法 1 室内路径规划改进 Dijkstra 算法

输入：室内空间有向加权结构图 SP，目标店铺的绝对位置集合 $LocS\{Ls_1, Ls_2, \dots, Ls_n\}$ ，顾客的绝对位置 LocC，目的店铺和顾客之间的相对距离矩阵 Dist，路径选择约束集合 $Const\{C_1, C_2, \dots, C_m\}$

输出：符合路径规划要求的最短路径 Path

```
1. ADD LocC INTO Path(0)
2.  $i = 0$ , while  $i \leq Num(const)$  do
3.   for  $Path^{(i)} \in Path_i$  do
4.      $prePath \leftarrow Path^{(i)}$ 
5.      $Path \leftarrow Dijkstra(SP, Dist, Const, prePath)$ 
6.     for each  $LocS_i$  do
7.        $Path^{(i)}[LocC, Ls_i] \leftarrow Path^{(i)}[LocC, Ls_i] + Dist[Ls_i]$ 
8.       for each  $c \in Const$  and  $j \neq c$  do
9.          $Path^{(i,j)}[LocC, Ls_i] \leftarrow Path^{(i)}[LocC, Ls_i] + Dist[Ls_i]$ 
10.        ADD  $Path^{(i,j)}[LocC, Ls_i]$  INTO  $Path_{i+1}$ 
11.      end for
12.    end for
13.  end for
14.   $i = i + 1$ 
15. end while
16. return Min(Path)
```

(2) 物理路径实体模型构建。在物理层中利用 RFID 数据采集设备及空间实体模型库，快速进行物理实体信息采集，实现楼层、房间、墙壁等室内空间要素的展现，提供对室内空间要素状态的数据定义、数据输入和数据输出等；在交互层中将室内空间要素传输至虚拟层，同时，也可将虚拟层的模拟分析结果反馈至物理层，实现虚实交互和决策反馈。室内路径规划方法的对象是点的集合、点和点的距离，一般的方法是采用图的形式，更加直观。

3 实验与验证

以某购物中心为例，将某天任意抽取来访该购物中心内的 10 位顾客作为研究对象，收集购物中心和顾客的相关数据，将顾客的实际选择路径、传统 Dijkstra 算法得到的路径与本文中基于数据孪生的室内空间路径规划模型得到的路径。表 1 列出了室内空间结构，顾客所选择的店铺和顾客之间的相对距离，目的店铺及客户绝对位置等模型输入信息。

表 1 模型输入

模型输入	具体数值
室内空间结构	163 个店铺、15 条走廊、3 个垂直电梯、3 个楼梯、6 个拥堵点
顾客数量	10 个
店铺与顾客相对距离	10 个距离矩阵
店铺绝对位置	(0.0, 15.23)(18.00, 22.36) ⋯ (25.00, 20.62) (32.56, 14.56)
顾客绝对位置	(22.36, 14.56) (25.00, 42.72) ⋯ (15.23, 0.00) (32.20, 32.20)

基于数字孪生的室内空间路径规划方法为保证更加准确的模拟路径选择过程，建立模型对路径规划过程进行模拟仿真，并得出满足约束的路径规划最优解。通过对比顾客的实际选择路径、传统 Dijkstra 算法得到的路径与本文中基于数据孪生的室内空间路径规划模型得到的路径用时情况和满足约束程度来验证模型的有效性。

图 3 描述了 3 种方法的路径用时情况，对 10 位顾客的目标店铺进行路径规划，分别计算完整路径的全部用时。采用本文中基于数据孪生的室内空间路径规划模型得到的结果用时均比顾客选择路径的用时短，而采用传统 Dijkstra 算法得到的结果用时部分情况下比顾客选择路径用时长。

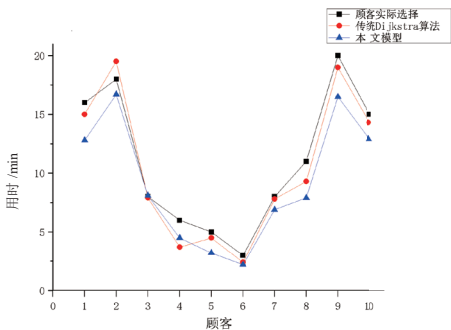


图 3 路径用时情况

图 4 描述的是 3 种方法的约束满足程度，根据选择或规划得到的路径所遇到的约束情况，如经过楼梯、经过拥堵点、未包含某个目标店铺的次數，与满足所有约束条件的情况进行比较，得到路径的约束满足程度。采用本文中基于数据孪生的室内空间路径规划模型得到的结果的约束满足程度均在 85% 以上，而采用顾客选择路径和传统 Dijkstra 算法得到路径的约束满足程度均不稳定，且部分低于 60%。

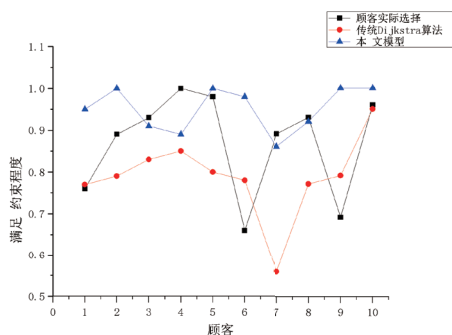


图4 约束满足程度

根据上述结果分析,针对顾客规模为10个的室内空间路径规划问题,基于数字孪生优室内空间路径规划模型得到的路径在用时和约束满足程度上均比在顾客实际选择和传统Dijkstra算法得到的路径更为优异,模型在实际应用中具有较好效益。

4 结语

本文提出了一个基于数字孪生的室内空间路径规划模型,利用数字孪生技术“虚拟层-交互层-物理层”的分层架构在室内空间环境下进行建模,构建虚拟路径实体模型和物理路径实体模型,实现对室内空间路径规划的精确模拟和仿真优化,并通过实验验证模型在实际应用中具有较好效益。在后续工作中,将考虑支持通用场景和多场景应用的室内路径规划模型。目前数字孪生涉及大规模应用的场景比较有限,通用场景应用需要汇总室内空间中的各类信息数据,归纳提出共同特征,建立通用场景数字孪生模型,而多场景应用则需要考虑多种室内空间要素和多种应用场景,是数字孪生建模过程中的极大挑战。

参考文献:

- [1] MICHAEL G, JOHN V. Digital twin: mitigating unpredictable, undesirable emergent behavior in complex systems[J]. Transdisciplinary perspectives on complex systems, 2017: 85-113.
- [2] ERIC J T, ANTHONY R I, THOMAS G E, et al. Reengineering aircraft structural life prediction using a digital twin[EB/OL]. (2011-10-23)[2024-01-18]. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1155/2011/154798>.
- [3] ZHUANG C B, LIU J H, XIONG H. The connotation, architecture and development trend of product digital twins[J]. Computer integrated manufacturing system, 2017,4:753-768.
- [4] GITHENS G. Product lifecycle management: driving the next generation of lean thinking[J]. Product lifecycle management, 2007, 24(3):278-280..
- [5] JIN P Q, WANG N, ZHANG X X, et al. Moving object data management for indoor spaces[J]. Chinese journal of

computers, 2015,38(9):1-20.

- [6] ELFES A. Using occupancy grids for mobile robot perception and navigation[J]. Computer, 2002, 22(6):46-57.
- [7] KIM J S, KANG H Y, LEE T H, et al. Topology of the prism model for 3D indoor spatial objects[C]// 2009 Tenth International Conference on Mobile Data Management. Piscataway: IEEE, 2009: 698-703.
- [8] GROGERG, PLUMER L. CityGML: interoperable access to 3D city models[J]. ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing, 2012, 71(7):12-33.
- [9] BECKER C, DURR F. On location models for ubiquitous computing[J]. Personal & ubiquitous computing, 2005, 9(8): 20-31.
- [10] LI D D, LEE D L. A topology-based semantic location model for indoor applications[C]// ACM Sigspatial International Conference on Advances in Geographic Information Systems. New York: ACM, 2008:1-10.
- [11] BECKER T, NAGEL C, KOLBE T H. Supporting contexts for indoor navigation using a multilayered space model[C]// Tenth International Conference on Mobile Data Management. Piscataway: IEEE, 2009:680-685.
- [12] LI X, CLARAMUNT C, RAY C. A grid graph-based model for the analysis of 2D indoor spaces[J]. Computers environment & urban systems, 2010, 34(6):532-540.
- [13] MEHTA A, BHAGAT R, SHAH R, et al. Indoor navigation assistance system using bluetooth[EB/OL]. (2016-01-07)[2024-02-19]. https://www.researchgate.net/publication/347834404_INDOOR_NAVIGATION_ASSISTANCE_SYSTEM_USING_BLUETOOTH.
- [14] MEGALINGAM R K, RAJENDRAN A P, DILEEPKUMAR D. LARN: indoor navigation for elderly and physically challenged[C]// 2013 IEEE Global Humanitarian Technology Conference (GHTC). Piscataway: IEEE, 2013:326-330.
- [15] XU Y C, WEN Z G, ZHANG X Y. Indoor optimal path planning based on dijkstra algorithm[EB/OL]. (2015-08-30)[2024-04-16]. <https://www.semanticscholar.org/paper/Indoor-optimal-path-planning-based-on-Dijkstra-Xu-Wen/508b1a01312407b8c23c1ad7a1ef7af4e7cd3f21>.

【作者简介】

陈新中(1964—),男,河南漯河人,博士,研究员、高级工程师,研究方向:指挥信息系统总体设计。

李敬雯(1991—),通信作者(email: 404424722@qq.com),女,山东日照人,硕士,工程师,研究方向:数据库技术。

(收稿日期: 2024-09-11)