

文章编号:1674-8190(2023)01-165-10

基于时空数据模型的障碍物数据集 数据查询与应用研究

赖欣, 梁昌盛, 朱美玲

(中国民用航空飞行学院 空中交通管理学院, 广汉 618307)

摘要: 障碍物数据集是国际民航组织在航空情报管理(AIM)体系下提出的一种基于航空信息交换模型(AIXM)规范的航空情报数据集,该数据集中障碍物的查询将直接影响机场净空评估与飞行程序设计。在分析障碍物数据集的时间与空间属性基础上,利用时空数据模型与航空信息交换模型规范,提出一种基于时间点和空间位置的障碍物数据集查询方法,用于解决障碍物数据集的查询问题;构建障碍物查询与可视化系统,并通过设计随机实验和实例应用对该方法的可行性和可靠性进行验证。结果表明:该障碍物数据集查询方法能够提取出对机场净空与飞行程序设计有影响的障碍物,增强了飞行程序设计人员对机场障碍物分布的情景意识。

关键词: 航空情报数据集;时空数据模型;航空信息交换模型;数据查询;障碍物可视化

中图分类号: V355

文献标识码: A

DOI: 10.16615/j.cnki.1674-8190.2023.01.20

Research on data query and application of obstacle dataset based on spatio-temporal data model

LAI Xin, LIANG Changsheng, ZHU Meiling

(College of Air Traffic Management, Civil Aviation Flight University of China, Guanghan 618307, China)

Abstract: The obstacle dataset is a kind of aeronautical information dataset based on the aeronautical information exchange model (AIXM) specification proposed by International Civil Aviation Organization (ICAO) under the aviation intelligence management (AIM) system. The query of the obstacle dataset can directly affect the airport clearance assessment and flight procedure design. Based on the analysis of the temporal and spatial attributes of the obstacle dataset, an obstacle dataset query method based on temporal point and spatial location is proposed by using the spatio-temporal data model and AIXM specification to solve the query problem of the obstacle dataset. The obstacle query and visualization system is constructed, and the random experiments and example applications are designed to verify the feasibility and reliability of the query method. The results show that according to the method, the obstacles that impact on the airport clearance and flight procedure design can be extracted, and the flight procedure designers' situation awareness of the airport obstacle distribution can be enhanced.

Key words: aeronautical information datasets; spatio-temporal data model; AIXM; data query; visualization of obstacles

收稿日期: 2022-03-14; 修回日期: 2022-06-06

基金项目: 中央高校教育教学改革专项(E2021023); 民航局教育科研基金(0252101)
中国民用航空飞行学院大学生创新创业训练项目(S202110624188)

通信作者: 梁昌盛, 15893039788@163.com

引用格式: 赖欣, 梁昌盛, 朱美玲. 基于时空数据模型的障碍物数据集数据查询与应用研究[J]. 航空工程进展, 2023, 14(1): 165-174.
LAI Xin, LIANG Changsheng, ZHU Meiling. Research on data query and application of obstacle dataset based on spatio-temporal data model[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2023, 14(1): 165-174. (in Chinese)

0 引言

国际民航组织 2008 年提出了从航空情报服务向航空情报管理(Aeronautical Information Management, 简称 AIM)转变的要求,为规范航空情报管理体系下的数据管理与发布,采用航空信息交换模型(Aeronautical Information Exchange Model, 简称 AIXM)规范作为航空情报各类数据的底层数据结构^[1-3]。

随着航空情报的发展和 AIXM 的不断完善,国际民航组织在 2018 年出版的《航空情报管理(Doc 10066)》中详细说明了障碍物数据集是通过点、线或多边形表示障碍物特征,同时必须按照规定的强制属性列表加以说明的数据集^[4]。国外已有很多针对 AIXM 格式的障碍物数据集管理的系统软件,如 Esri 公司开发的 ArcGIS Aviation、HEXAGON 公司开发的 Luciad AIXM5 Viewer、和 Eurocontrol 开发的 Jumpstart 等^[5]。国内现阶段正在大力推进航空情报管理发展,徐杏玲等^[6]对 AIXM5.1 编码关键点进行了详细的分析;胡敬玉^[7]对 AIXM 的编码规则进行了详细的总结,并进行了 AIXM 空域类数据可视化研究。上述研究主要集中在 AIXM 文件的编码规则,未涉及 AIXM 文件的查询方法,同时对 AIXM 格式的障碍物数据集的研究和应用较少。

AIXM 格式的障碍物数据文件是时空数据集,目前国内外关于时空数据检索的研究很多,H. C. Viet-Ngu 等^[8]提出基于 Hadoop 框架的并行 R 树构建方案,提高了对大数据的检索;A. Azqueta-Alzuaz 等^[9]提出一种并行加载海量数据的方案,提高了 HBase 的数据加载效率;宋明明^[10]提出一种改进 R 树的索引结构 SR-R 树,提高了对路径的检索效率;何帆^[11]提出 Invert-GeoCubR 树分布式索引框架,实现了海量船舶自动识别系统数据的快速检索;赵英豪等^[12]设计了一种面向海量时空数据的多维检索策略,大幅提升了出租车轨迹数据的检索效率;胡林舒^[13]提出 GeoFlow-FEAF 地图瓦片高效生成算法,以实际道路运行状况为实例验证了算法的高效性。

上述研究主要解决了提高连续渐变的时空数据检索速度问题,而在实际航空运行中航空实体变化分为永久变化和临时变化,临时变化是叠加在永久状态上的^[14-15],因此 AIXM 所描述的航空实体数据变化并不是连续渐变的。在查询 AIXM 数据时不能仅考虑连续的时间与空间,还需要将基态时间片和临时时间片叠加^[16],才能得到当前航空实体的状态。

为解决 AIXM 障碍物数据的查询问题和实现 AIXM 障碍物数据集在飞行程序设计阶段的应用,本文通过分析航空信息交换模型规范、障碍物数据集的时间和空间属性以及时空数据模型,提出一种基于时间点和空间位置的 AIXM 障碍物数据集数据查询方法,并通过实例验证该方法的可行性与可靠性。

1 相关概念与技术

1.1 航空信息交换模型

航空信息交换模型用数字化形式描述航空情报信息,改变了以往通过纸质传递信息的方式,可以提高空中交通的安全性和准确性。AIP、NOTAM、障碍物等数据都有相应的 AIXM 编码规范,因此 AIXM 可以为航空数据的广泛应用提供数据层的支持。目前在全球普遍采用的 AIXM5.1 提供了一套基于 GML 规范的 XML Schema 框架^[17]。在 AIXM5.1 中不同类型的航空实体对应不同的航空信息概念模型,该模型以 UML 形式呈现。AIXM 文件框架的 UML 图如图 1 所示,可以看出:AIXM 由 AIXMBasicMessage、AIXMFeature、AIXMTimeSlice、AIXMFeaturePropertyGroup 组成,其中 AIXM 基础信息(AIXMBasicMessage)的子节点为 AIXM 实体(AIXMFeature),每个实体有至少一个时间片(AIXMTimeSlice),时间片中包含实体的属性(AIXMFeaturePropertyGroup),在 AIXM 中规定了各个实体中必须编辑的基本属性,若属性无法表达时,可以通过编辑 extension 进行扩张,若包含复杂属性,可以通过 AIXM 对象(AIXMObject)表达。

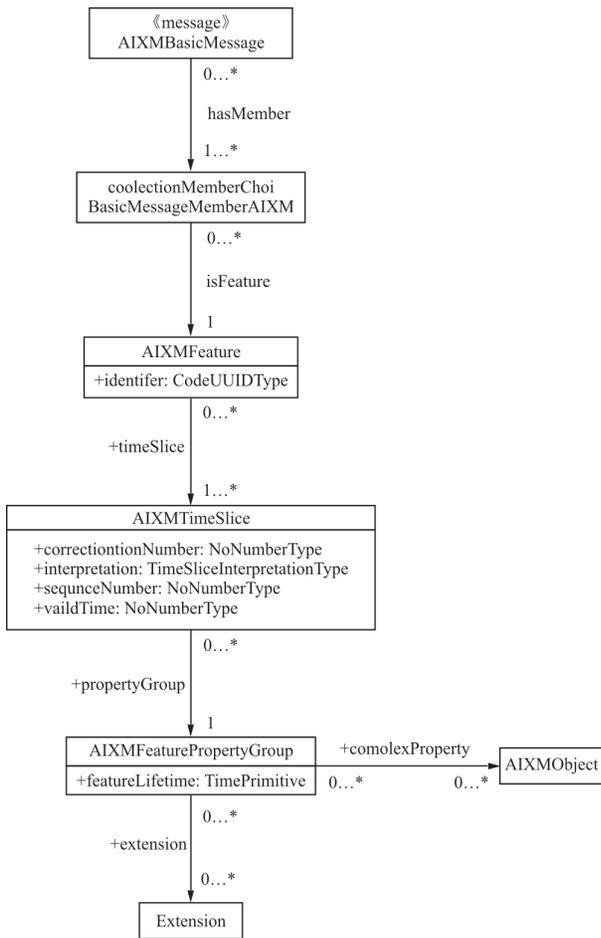


图 1 AIXM 文件框架的 UML 图^[5]
Fig. 1 UML diagram of the AIXM document framework^[5]

1.2 时空数据模型

由 AIXM 文件框架分析可知, AIXM 实体是 GML 规范的衍生, 航空实体中最重要的属性即为时间与空间属性。目前针对不同的时间与空间属性, 提出了多种时空数据模型。与航空实体四类时间属性具有一致性的模型包括:

模型 1: 序列快照模型, 如图 2(a) 所示, 通过对连续的时间进行离散化, 存储每个时间片段下完整的空间信息及属性信息作为该片段的快照, 然后根据用户指定查询的时间对应片段的快照进行输出^[18]。

模型 2: 基态修正模型, 如图 2(b) 所示, 将某个时间点的空间信息保存为基态文件, 其他时刻仅保存相对于基态的变化量, 不存储每个时间的全部信息, 便于历史溯源^[19]。

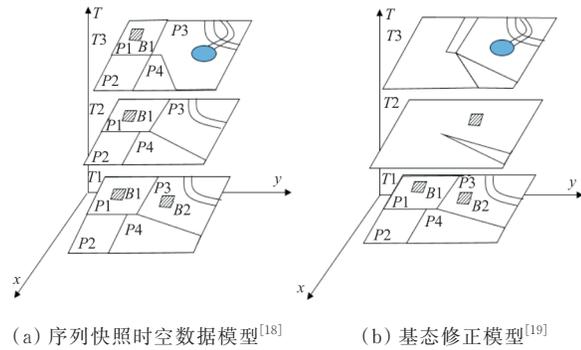


图 2 序列快照模型与基态修正模型对比
Fig. 2 Sequent snapshots model vs. base state with amendments model

模型 3: 基于事件的时空数据模型, 将某一区域内的每一次状态变化视为一个事件, 并将其表示在时间轴上^[19-20]。

模型 4: 面向对象的时空数据模型, 是一种能够描述时空对象的空间和时间语义及对象间关系的方法^[21-23]。

模型 5: 基于事件对象的时空数据模型, 是模型 3、模型 4 的改进模型, 采用面向对象的方法组织时空数据, 将事件归纳编码标记在各基本单元上, 以实现事件驱动数据的更新。可以表示为 $\{M_{OID}, S(t), T(T_s, T_e), A(t), B\}$, 其中, M_{OID} 为对象的唯一标识码, 通过该标识码与相关信息进行关联, S 为对象的空间信息, T 为对象的时态信息, A 为对象的属性信息, B 为行为特征, t 为事件时间, T_s 为对象生成时间, T_e 为对象消亡时间^[22]。

1.3 时空模型的检索方法相关定义

AIXM 本质是 XML 文件, 数据结构属于树结构, 在基于树结构的时空检索技术中, 最具代表性的方法是 R 树空间索引技术。其相关定义为: 最小包围矩形 (Minimum Bounding Rectangle, 简称 MBR) 是指以给定的 2 维形状各顶点中的最大横坐标、最小横坐标、最大纵坐标、最小纵坐标标定下边界的矩形^[24]。

R 树是一种平衡树, 通过最小包围矩阵将多维空间分割为多个层次, 可以大幅减少空间搜索中的结点访问量^[25]。在构建一棵 R 树时, R 树的结点结构可以分为叶子结点和非叶子结点, 叶子结点包含该空间目标的特征信息和 MBR, 非叶子结点包含指向子结点的指针和该空间目标的 MBR^[10]。

2 航空情报数据集的时空数据模型分析

根据 1.1 节相关概念与技术介绍,基于 AIXM 规范的航空情报数据集是时空地理信息数据集, AIXM 的时间特征模型包含解释(interpretation)、序列号(sequence number)和校正号(correction number)三类属性。解释指定时间片的类型,序列号用来更新之前的时间片,同时需要校正号校正之前的时间片^[14-15]。AIXM 提供的时间特征模型提供了 4 种时间片:基线时间片(BASELINE)、临时时间片(TEMPDELTA)、快照时间片(SNAPSHOT)和永久改变时间片(PEMDELTA)。其结构实例如图 3 所示。

```

<aixm:timeSlice>
  <aixm:VerticalStructureTimeSlice gml:id="VST0001">
    <!--有效时间段-->
    <gml:validTime>
      <gml:TimePeriod gml:id="vt0001">
        <gml:beginPosition>2021-08-05T15:00:00Z</gml:beginPosition>
        <gml:endPosition indeterminatePosition="unknown" />
      </gml:TimePeriod>
    </gml:validTime>
    <!--时间片类型: BASELINE、TEMPDELTA、SNAPSHOT、PEMDELTA-->
    <aixm:interpretation>BASELINE</aixm:interpretation>
    <!--序列号-->
    <aixm:sequenceNumber>1</aixm:sequenceNumber>
    <!--校正号-->
    <aixm:correctionNumber>0</aixm:correctionNumber>
    <aixm:featureLifETIME>
      <gml:TimePeriod gml:id="ft0001">
        <gml:beginPosition>2021-08-05T15:00:00Z</gml:beginPosition>
        <gml:endPosition indeterminatePosition="unknown" />
      </gml:TimePeriod>
    </aixm:featureLifETIME>
  </aixm:VerticalStructureTimeSlice>
</aixm:timeSlice>
  
```

图 3 AIXM 时间片模型实例

Fig. 3 Example of an AIXM time slice model

通常用基线时间片(BASELINE)描述航空实体从建立开始一直到结束的长期时间段下所保持的基本状态。但在航空运行过程中,经常会发生一些临时事件,导致航空实体的属性发生临时变化,例如某一障碍物的标识灯损坏,在修复时期内,该障碍物损坏,此时就需要编写临时时间片(TEMPDELTA),通过临时时间片描述航空实体临时时间特征属性值及其有效时间,当航空实体的某一属性存在基线时间片和临时时间片两种时间属性时,基线时间片描述的属性在临时时间片有效时间段内失效。当航空实体的属性发生永久

变化时,则需要重新编写基线时间片,其生效时间重新设定为此次变化生效的时间点,同时还需要编写永久改变时间片记录航空实体属性的改变,便于历史溯源。而快照时间片用于描述某一时刻航空实体的所有属性值,是有效的基线时间片信息与有效的临时时间片合并的结果,属于查询航空实体的结果文件。

障碍物实例变化过程如图 4 所示,在 t_0 时刻建立新障碍物,编写基态时间片和基态永久改变时间片,由于障碍物标识灯损坏导致该障碍物的标识灯在 $t_2 \sim t_3$ 时间段关闭,需要编写临时时间片;在 t_3 时刻查询该障碍物状态,编写快照时间片,此时查询障碍物的状态是基态时间片和临时时间片的叠加状态;在 t_4 时障碍物位置发生改变,需要编写基态时间片和永久改变时间。

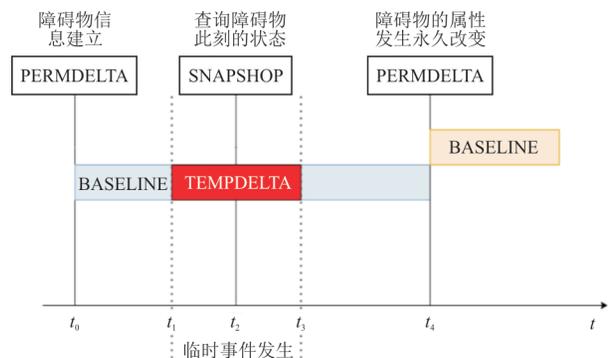


图 4 障碍物变化及相应时间片对应关系

Fig. 4 Obstacle change and corresponding time slice

综上所述,结合目前时空数据模型和 AIXM 的时间片定义,本文对 AIXM 提供的 4 种时间片得到以下分析结论:

(1) 快照时间片提供航空实体当前状态信息,对应序列快照模型。

(2) 永久改变时间片记录航空实体属性的改变,提供历史溯源,对应基线修正模型。

(3) 临时时间片和基线时间片是根据航空实体因事件变化而编写其不同时间段的状态信息。当事件导致航空实体发生临时改变时,编写临时时间片;当事件引起航空实体发生永久改变时,编写基线时间片;在两时间片同时有效时,临时时间片的优先级高于基线时间片,临时时间片描述的信息为有效信息,因此临时时间片与基线时间片

对应基于事件对象的时空数据模型。

参考基于事件对象的时空数据模型,本文将 AI-XM 抽象表达为 $\{M_{\text{UUID}}, S(t), T(t_s, t_e), A(t), I, E\}$ 其中, M_{UUID} 为对象的唯一标识, S 为对象的空间信息, T 为对象的时态信息, t_s 为对象生成时间, t_e 为对象消亡时间, A 为对象的属性信息, E 为事件, I 为时间片类型。

3 障碍物数据集查询

3.1 障碍物数据集查询方法设计

结合基于事件对象的时空数据模型和 R 树空间索引算法,本文提出一种基于时间点和空间位置的 AIXM 格式的障碍物数据集查询方法,查询方法流程如图 5 所示。

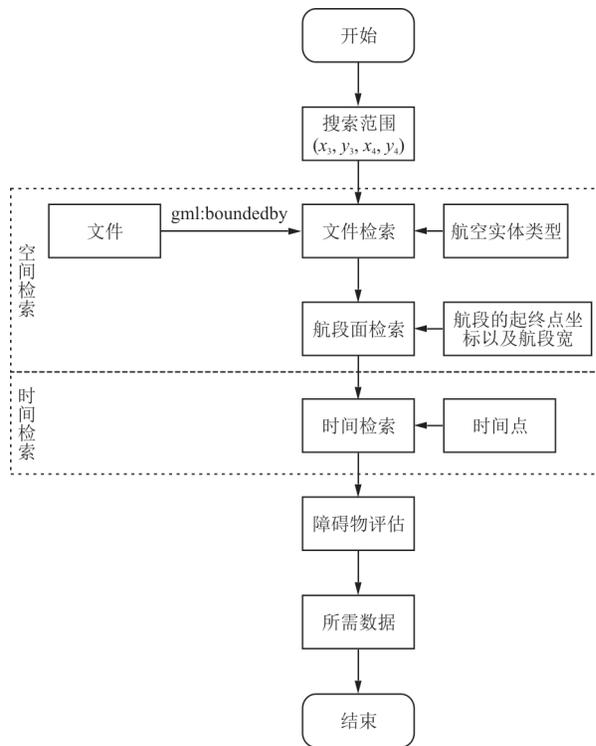


图 5 查询方法流程
Fig. 5 Query method flow

查询步骤如下:

步骤 1: 文件检索, 通过元数据中 $\langle \text{gml:boundedby} \rangle$ 标签提供该障碍物数据集的地理范围 (x_1, y_1, x_2, y_2) , 构建非叶子节点的最小外包矩形 (MBR), 通过与输入搜索范围 (x_3, y_3, x_4, y_4) 所构成的搜索区域 MBR 进行比较, 输出返回的指向子结

点的指针与搜索范围重叠或包含搜索范围的文件名。

文件与搜索范围有重叠, 则满足以下公式:

$$\begin{cases} a_1 = 1 & (x_4 < x_1 < x_3) \\ a_2 = 1 & (x_4 < x_2 < x_3) \\ a_3 = 1 & (y_4 < y_1 < y_3) \\ a_4 = 1 & (y_4 < y_2 < y_3) \\ a_1 + a_2 + a_3 + a_4 \geq 2 \end{cases} \quad (1)$$

搜索范围在文件中, 则满足以下公式:

$$\begin{cases} a_1 = 1 & (x_2 \leq x_3 \leq x_1) \\ a_2 = 1 & (x_2 \leq x_4 \leq x_1) \\ a_3 = 1 & (y_2 \leq y_3 \leq y_1) \\ a_4 = 1 & (y_2 \leq y_4 \leq y_1) \\ a_1 + a_2 + a_3 + a_4 = 4 \end{cases} \quad (2)$$

步骤 2: 依据航段面检索障碍物, 根据输入的航段起终点坐标及航段宽度生成多边形面的搜索矩形, 对步骤 1 结果所指文件中障碍物位置信息进行裁剪操作, 筛选出在航段内的障碍物的 UUID。

具体的检索公式为

$$\begin{cases} \alpha = \text{Inverse}(x_1, y_1, x_2, y_2) \\ (x_3, y_3, x_4, y_4) = \text{Forward}(x_1, y_1, L, \alpha + 90^\circ) \\ M = \text{polygon}(x_1, y_1, x_2, y_2, x_3, y_3, x_4, y_4) \\ N_i = 1 & ((x_i, y_i) \text{ 与 } M \text{ 相交}) \\ N_i = 0 & ((x_i, y_i) \text{ 不与 } M \text{ 相交}) \\ M_{\text{UUID}} = \{M_{\text{UUID}}\} & (N_i = 1) \end{cases} \quad (3)$$

式中: Inverse 为贝塞尔大地主题反解过程; Forward 为贝塞尔大地主题正解过程; x_i, y_i 为障碍物坐标; N 为障碍物与面的位置关系。

步骤 3: 时间检索, 依据 UUID 关联障碍物的时间属性及输入查询时间点筛选出在此时间点有效的实体, 进一步根据时间片属性处理重复的 UUID 所关联的属性信息, 其基本思路是: 当同一个航空实体在同一时间点下存在基态时间片和临时时间片时, 将临时时间片所描述的属性替换到基线时间片中。若时间片属性一致选取最大序列号和最大校正号对应的属性信息。具体算法描述如下:

算法 1 时间检索

```

输入: 航段内的障碍物的 UUID, OBS 障碍物数据集, 查询时间
T, 障碍物属性 A
输出: result 结果数据集
1: result ← {}
2: for ID ∈ UUID do
3:   OBSY ← timein(OBS(ID), T)
   /*筛选出有效的数据*/
4: end for
5: repeat ← duplicate(OBSY)
   /*筛选出重复的UUID对应数据*/
6: if len(repeat) > 0 then
7:   flag ← 0
8:   for feature ∈ repeat do
9:     for a → A do
10:      if feature < a, I > == 'TEMPDLTA' then
11:        flag ← 1
12:      end if
13:      if flag == 1 then
14:        feature1 ← drop(feature < a, I > == 'BASELINE')
15:        OBS2 ← merge(feature1)
        /*合并属性数据集*/
16:      end if
17:    end for
18:  end for
19: end if
20: OBS3 ← merge(OBS2, OBS) /*按UUID合并数据集*/
21: result ← getMax(OBS3)
   /*选取最大序列号与最大校正号对应的数据*/
22: return result

```

步骤 4: 障碍物判断, 通过坐标构建航段面方程, 将障碍物坐标带入航段面方程, 得到对应位置的面高, 与障碍物的高进行比较, 筛选出高于航段面的障碍物。

具体公式为

$$\begin{cases}
 z_3 = z_1 \\
 a = (y_2 - y_1)(z_3 - z_2) - (y_3 - y_2)(z_2 - z_1) \\
 b = (z_2 - z_1)(x_3 - x_2) - (x_2 - x_1)(z_3 - z_2) \\
 c = (x_2 - x_1)(y_3 - y_2) - (y_2 - y_1)(x_3 - x_2) \\
 d = -(ax_1 + by_1 + cz_1) \\
 h_i = -\frac{ax_i + by_i + d}{c} \\
 P(z_i) = 0 \quad (z_i < h_i) \\
 P(z_i) = 1 \quad (z_i \geq h_i)
 \end{cases} \quad (4)$$

式中: $(x_1, y_1, z_1), (x_2, y_2, z_2), (x_3, y_3, z_3)$ 为航段面的起点, 终点, 起点段的端点; a, b, c, d 分别为平面方程的系数; h_i 为障碍物所处位置对应的面高;

x_i, y_i 为障碍物坐标; z_i 为障碍物高; $P(z_i)$ 为障碍物与面的高度关系。

3.2 障碍物数据集查询及可视化系统

为了对提出的障碍物数据集查询方法进行验证, 本文设计障碍物数据集查询及可视化系统。该系统可提供针对航段的障碍物数据查询和数据可视化功能, 系统框架如图 6 所示。系统包含三层架构, 利用 Python 和 Keyhole 标记语言 (Keyhole Markup Language, 简称 KML) 技术构建。当系统接收到可视化查询请求时, 首先调用业务逻辑层, 运行本文提出的检索方法; 然后由数据可视化模块将查询结果组织为 KML 格式文件, 利用 Google earth 平台实现数据可视化。

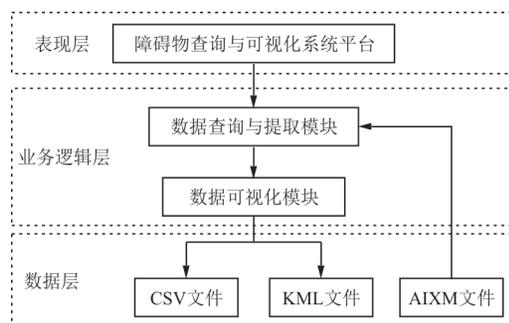


图 6 系统框架图

Fig. 6 System framework

4 实验验证

实验数据: 目前国内未公开发布 AIXM 数据集, 因此本实验选来自西于西班牙航空情报机构所公开的 AIXM 格式的障碍物数据集, 其部分实验数据如图 7 所示。

实验设计: 为了达成对方法可行性与准确性的验证, 本文设计随机实验和应用实验两个实验环节。随机实验, 通过输入随机数据, 验证系统实现查询的可行性; 应用实验, 选取实际公布的进近程序中最后进近航段信息数据, 并通过本系统筛选障碍物, 推导出其最小下降梯度, 与实际下降梯度对比, 进而验证查询方法的准确性。

随机试验过程描述: 随机生成一航段的起始与终点的坐标、时间和航段宽, 筛选出障碍物, 随机限制条件为: 经纬度区间分别为 $[-8.380, -8.400]$, $[43.280, 43.310]$, 两点高度区间为 $[100, 300]$, 航路半宽随机区间为 $[50, 200]$ 。时间

点区间为:2020年9月到2022年2月。随机生成的 输入数据如表 1 所示。

```

> 数据集资料 > 西班牙障碍物数据 > OBST AD LECO > LE_Amdt_A_2020_03_AIP_DS_FULLL_Obstacles_LECO_Metadata.xml > gmd:MD_Metadata > gi
1  <?xml version="1.0" encoding="UTF-8"?>
2  <gmd:MD_Metadata xmlns:gco="http://www.isotc211.org/2005/gco"
3  xmlns:gmd="http://www.isotc211.org/2005/gmd"
4  xmlns:gml="http://www.opengis.net/gml/"
5  xmlns:gts="http://www.isotc211.org/2005/gts/"
6  xmlns:xlink="http://www.w3.org/1999/xlink/" xmlns:xsi="http://www.w3.org/2001/XMLSchema-instance">
7  <gmd:fileIdentifier>
8  <gco:CharacterString>LE_Amdt_A_YYYY_NN_AIP_DS_FULLL_Obstacles_ADHP_Metadata</gco:CharacterString>
9  </gmd:fileIdentifier>
10 <gmd:language>
11 <gmd:LanguageCode
12 codeList="./resources/codeList.xml#LanguageCode" codeListValue="eng">eng</gmd:LanguageCode>
13 </gmd:language>
14 <gmd:characterSet gco:nilReason="missing"/>
15 <gmd:parentIdentifier gco:nilReason="missing"/>
16 <gmd:hierarchyLevel>
17 <gmd:MD_ScopeCode
18 codeList="./resources/codeList.xml#MD_ScopeCode" codeListValue="dataset">dataset</gmd:MD_ScopeCode>
19 </gmd:hierarchyLevel>
20 <gmd:hierarchyLevelName gco:nilReason="missing"/>
21 <gmd:contact>
22 <gmd:CI_ResponsibleParty>
23 <gmd:individualName gco:nilReason="missing"/>
24 <gmd:organisationName>
25 <gco:CharacterString>AIS-Spain (ENAIRES)</gco:CharacterString>
26 </gmd:organisationName>
27 <gmd:positionName gco:nilReason="missing"/>
28 <gmd:contactInfo>
29 <gmd:CI_Contact>

```

图 7 西班牙障碍物数据集截选

Fig. 7 A selection of Spanish obstacle datasets

表 1 随机生成的输入数据

Table 1 Randomly generated input data

输入	坐标
航段起点	(-8.405, 43.317, 150)
航段终点	(-8.405, 43.334, 150)

经过本系统筛选后的实验结果如图 8 所示,将航段信息可视化,连接起点和终点形成红色航线,并以航段半宽为扩展距离将航线向两侧扩展形成白色保护区,障碍物以点的形式标注。



图 8 实验结果图

Fig. 8 Graph of experimental results

通过点击障碍物弹出该障碍物的基本信息框,如图 9 所示,框中展示了该障碍物的 UUID、障碍物类型、坐标、高度和有效时间。由实验结果数据可知,根据输入数据筛选出 27 个数据,通过 Google earth 工具测量出所生成的航段宽度为两段的宽度,分别为 301.32 和 301.2 m,并与人工计算筛选出的数据点的高度进行对比,满足筛选条件。因此该实验证明本文设计的系统达到了需求目标。

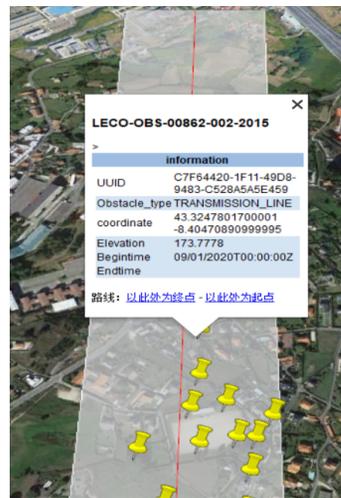


图 9 基本信息框

Fig. 9 Basic information frame

应用实验过程描述:选取西班牙的 Valencia 机场 12 号跑道的 RNP 进近程序的最后进近航段信息数据(程序剖面图如图 10 所示,其中 1 n mile=1.852 km)进行实例应用验证。在其他条件相同的情况下,改变下降梯度,通过本文设计的方法筛选障碍物,重新计算该航段最小下降梯度,与公布程序的最小梯度比较,若计算结果小于公布程序的最小梯度,则证明该方法筛选查询障碍物是准确的。

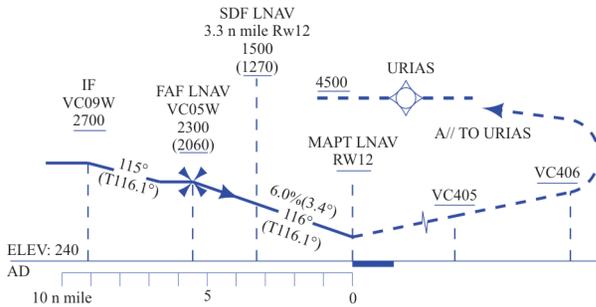


图 10 Valencia 机场 12 号跑道 RNP 程序剖面图
Fig. 10 Valencia RWY 12 RNP procedure profile

根据 12 号跑道的基本信息、最后进近航段的航向、定位点坐标和设计程序的最佳下降梯度,计算得到输入系统的最后进近点的高度,具体计算数据如表 2 所示。

表 2 FAF 高度计算表
Table 2 The altitude of FAF calculation table

数据类型	数值
MAPT 坐标	(39°29'46.9"N 000°30'00.4"W)
航段半宽/m	556
航段长度/n mile	5.5
MAPT 高度/m	88
最佳下降梯度/%	5.2
FAF 坐标	(39°32'12.0"N 000°36'22.5"W)
计算得 FAF 高度/m	617.672

利用本文设计的方法进行障碍物查询筛选。根据 Doc 8168 规定,最后进近航段的超障余度为 75 m,由此得到最后进近的最低超障判断面终点高度为 617.672-75=542.672 m。通过最低超障判断面筛出 73 m 障碍物须重新调整最后进近段的下降梯度。下降梯度计算表如表 3 所示。

表 3 下降梯度计算表
Table 3 Descending gradient calculation table

参数	数值
最高障碍物高度/m	143.575
最高障碍物坐标	(-0.525, 39.504)
跑道入口坐标	(39°29'46.9"N 000°30'00.4"W)
跑道入口高度/m	73
超障余度/m	75
航向真方位角 $\theta/(\circ)$	117
障碍物与航线之间的夹角 $\alpha/(\circ)$	4.243
障碍物到跑道入口的水平距离 L/m	2 296.865
最后进近航段的长度/n mile	5.5
计算下降梯度 $\beta/(\%)$	5.696
调整后最后进近定位点高/m	608.8 (1 997.3 ft)

将表 3 的计算梯度结果与已公布程序梯度进行对比,对比结果如表 4 所示,可以看出:在本系统设计方法下,查询得到障碍物的计算梯度值均小于公布程序的数据。

表 4 计算结果与公布程序数据对比表
Table 4 Table comparing calculated results with published procedural data

类别	最小下降梯度/%	FAF 高度/m
计算梯度	5.696	608.8 (1 997.3 ft)
公布梯度	6.000	701.04 (2 300 ft)

5 结 论

(1) 本文将 AIXM 中时间特性模型的快照时间片、永久改变时间片分别归结为序列快照模型和基线修正模型,临时时间片及基线时间片归结为基于事件对象的时空数据模型。

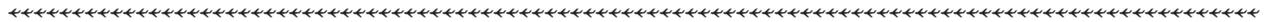
(2) 参考基于事件对象的时空数据模型和 R 树空间索引算法,提出针对时间点和空间位置的 AIXM 格式的障碍物数据集查询方法,解决了非连续渐变的 AIXM 格式的航空实体数据查询。

参考文献

- [1] ICAO. Manual on the digital exchange of aeronautical meteorological information: Doc 10003[S]. US: ICAO, 2014.
- [2] 赖欣,胡敬玉. 基于 AIXM 的民航共享数据集集成系统构建[J]. 计算机技术与发展, 2020, 30(6): 181-185.

- LAI Xin, HU Jingyu. Construction of civil aviation sharing data integration system based on AIXM[J]. Computer Technology and Development, 2020, 30(6): 181-185. (in Chinese)
- [3] EGAMI S, LU X, TKOGA, et al. Ontology-based data integration for semantic interoperability in air traffic management[C]// 2020 IEEE the 14th International Conference on Semantic Computing. [S.l.]: IEEE, 2020: 295-302.
- [4] ICAO. Aeronautical information management: Doc 10066 [S]. US: ICAO, 2018.
- [5] AIXM. Aeronautical information exchange model [EB/OL]. [2022-03-14]. <https://www.aixm.aero/>.
- [6] 徐杏玲, 宋柯. 掌握 AIXM5.1 航空数据交换模型的 5 把钥匙[J]. 空中交通, 2017(5): 9-13.
XU Xingling, SONG Ke. 5 keys to mastering the AIXM5.1 aviation data exchange model[J]. Air Traffic, 2017(5): 9-13. (in Chinese)
- [7] 胡敬玉. 基于 AIXM 的航空要素编码规则与可视化研究[D]. 广汉: 中国民用航空飞行学院, 2020.
HU Jingyu. Research on coding rules and visualization of aeronautical elements based on AIXM[D]. Guanghan: Civil Aviation Flight University of China, 2020. (in Chinese)
- [8] VIET-NGU H C, KANG-WOO L, IN-HAK J, et al. Improving the quality of an R-tree using the map reduce framework [C] // International Conference on Multimedia and Ubiquitous Engineering International Conference on Future Information Technology. Seoul, Korea: IEEE, 2017: 1-10.
- [9] AZQUETA-ALZUAZ A, PATINO-MARTINEZ M, BRONDINO I, et al. Massive data load on distributed database systems over HBase [C] // Proceedings of the 17th IEEE/ACM International Symposium on Cluster, Cloud and Grid Computing. Madrid, Spain: IEEE, 2017: 1-8.
- [10] 宋明明. 基于 R-树的空间数据库索引技术研究与应用[D]. 镇江: 江苏科技大学, 2014.
SONG Mingming. Research and application on spatial database index technology based on R-tree [D]. Zhenjiang: Jiangsu University of Science and Technology, 2014. (in Chinese)
- [11] 何帆. 船舶 AIS 大数据时空建模与快速检索方法研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2020.
HE Fan. Research on spatial-temporal model and fast retrieval method for big AIS data[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2020. (in Chinese)
- [12] 赵英豪, 吕亮, 徐青, 等. 一种面向海量时空数据的多维检索策略[J]. 测绘科学, 2020, 45(6): 199-204.
ZHAO Yinghao, LYU Liang, XU Qing, et al. A multidimensional retrieval strategy for massive spatiotemporal data [J]. Science of Surveying and Mapping, 2020, 45(6): 199-204. (in Chinese)
- [13] 胡林舒. 地理流学习型时空索引高效检索与计算[D]. 杭州: 浙江大学, 2021.
HU Linshu. Efficient learning spatial-temporal query and computing frameworking for geographic flow data [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2021. (in Chinese)
- [14] Eurocontrol. AIXM 5 temporality model[R]. US: Eurocontrol/FAA, 2010.
- [15] Eurocontrol. Data coding guidelines [EB/OL]. [2022-03-14]. <http://www.aixm.aero/page/data-codingguidelines>.
- [16] 曹闻. 时空数据模型及其应用研究[D]. 郑州: 中国人民解放军战略支援部队信息工程大学, 2011.
CAO Wen. Research on theory and applications of spatio-temporal data model[D]. Zhengzhou: Information Engineering University, 2011. (in Chinese)
- [17] OGC. Guidance and profile of GML for use with aviation data[R]. US: OGC, 2012.
- [18] 李旭晖, 刘洋. 时空数据建模方法研究综述[J]. 数据分析与知识发现, 2019, 3(3): 1-13.
LI Xuhui, LIU Yang. Review of spatio-temporal data modeling methods [J]. Data Analysis and Knowledge Discovery, 2019, 3(3): 1-13. (in Chinese)
- [19] 龙际梦, 蔡中祥, 刘宏建, 等. 基态修正时空数据模型的优化研究[J]. 测绘与空间地理信息, 2016, 39(5): 58-60, 64.
LONG Jimeng, CAI Zhongxiang, LIU Hongjian, et al. Optimization research of base state with amendments model [J]. Geomatics & Spatial Information Technology, 2016, 39(5): 58-60, 64. (in Chinese)
- [20] 郭群勇, 孙梅, 崔磊. 时空数据模型研究综述[J]. 地球科学进展, 2016, 31(10): 1001-1011.
WU Qunyong, SUN Mei, CUI Lei. A survey of the spatio-temporal data model[J]. Advances in Earth Science, 2016, 31(10): 1001-1011. (in Chinese)
- [21] 宋玮, 王家耀, 郭金华. 面向对象时空数据模型的研究[J]. 测绘科学技术学报, 2006, 23(4): 235-238.
SONG Wei, WANG Jiayao, GUO Jinhua. An object-oriented spatial-temporal data model[J]. Journal of Geomatics Science and Technology, 2006, 23(4): 235-238. (in Chinese)
- [22] 李勇, 谭建军, 陈少沛, 等. MDA 与事件驱动的面向对象时空数据建模研究[J]. 地球信息科学, 2007(3): 91-95, 127.
LI Yong, TAN Jianjun, CHEN Shaopei, et al. Research of object-oriented spatio-temporal data model based on MDA

- and event-driven[J]. *Geo-Information Science*, 2007(3): 91-95, 127. (in Chinese)
- [23] 刘岳峰, 康葳. 一种基于对象快照模型的时空查询原子模型[J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 2015, 51(4): 755-762.
- LIU Yuefeng, KANG Wei. An atomic model of spatiotemporal query based on object-oriented snapshot model[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2015, 51(4): 755-762. (in Chinese)
- [24] 赵慧慧, 赵凡, 陈仁海, 等. 基于地理空间大数据的高效索引与检索算法[J]. *计算机研究与发展*, 2020, 57(2): 333-345.
- ZHAO Huihui, ZHAO Fan, CHEN Renhai, et al. Efficient index and query algorithm based on geospatial big data[J]. *Journal of Computer Research and Development*, 2020, 57(2): 333-345. (in Chinese)
- [25] 宋纘蛟, 周佳悦, 王龙浩, 等. 采用 R 树和轨迹分段的 HMM 高效地图匹配方法[J/OL]. *系统仿真学报*: 1-11 [2022-03-14]. DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.21-1020.
- SONG Yanjiao, ZHOU Jiayue, WANG Longhao, et al. The efficient HMM map matching method using R-tree and trajectory segmentation[J/OL]. *Journal of System Simulation*: 1-11 [2022-03-14]. DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.21-1020. (in Chinese)
- 作者简介:**
- 赖欣(1977-), 女, 博士, 副教授。主要研究方向: 航空交通运输与规划, 航空信息服务与管理等。
- 梁昌盛(1998-), 男, 硕士研究生。主要研究方向: 交通运输与规划。
- 朱美玲(1995-), 女, 硕士研究生。主要研究方向: 交通运输工程。
- (编辑: 丛艳娟)



(上接第 164 页)

- [19] 王向军, 张继龙, 阴雷. 光流法运动估计在 FPGA 上的实现与性能分析[J]. *光学精密工程*, 2019, 27(1): 211-220.
- WANG Xiangjun, ZHANG Jilong, YIN Lei. Implementation and performance analysis of optical flow based motion estimation on FPGA[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2019, 27(1): 211-220. (in Chinese)
- [20] 戚烜. 基于混合可重构平台的光流法硬件加速研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2014.
- QI Xuan. Optical flow method accelerate research based on hybrid reconfigurable hardware platform[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2014. (in Chinese)
- [21] SREUYF L, DE B S, VAN U D H, et al. The battle of the giants—a case study of GPU vs FPGA optimization for real-time image processing[C]// *International Conference on Pervasive and Embedded Computing and Communication Systems*. US: IEEE, 2014: 112-119.
- [22] 王迎瑞, 黎雷生, 王景焘, 等. 光滑粒子流体动力学方法的高效异构加速[J]. *计算机学报*, 2017, 40(9): 2040-2056.
- WANG Yingrui, LI Leisheng, WANG Jingtao, et al. Acceleration of smoothed particle hydrodynamics method on CPU-GPU heterogeneous platform[J]. *Chinese Journal of Computers*, 2017, 40(9): 2040-2056. (in Chinese)
- [23] PLYER A, LE B G, CHAMPAGNAT F. Massively parallel Lucas Kanade optical flow for real-time video processing applications[J]. *Journal of Real-Time Image Processing*, 2016, 11(4): 713-730.
- [24] 孙瑞鑫, 朱国梁, 谢双懿, 等. 基于嵌入式 GPU 的 pyramid LK 光流法高速计算方法研究[J]. *计算机应用研究*, 2022, 39(7): 1966-1972.
- SUN Ruixin, ZHU Guoliang, XIE Shuangyi, et al. High-speed computing of pyramid LK optical flow based on embedded GPU[J]. *Application Research of Computers*, 2022, 39(7): 1966-1972. (in Chinese)
- [25] HORN B K P, SCHUNCK B G. Determining optical flow[J]. *Artificial Intelligence*, 1981, 17(1/3): 185-203.
- 作者简介:**
- 吴培灵(1996-), 女, 硕士研究生。主要研究方向: 图像处理。
- 张征宇(1971-), 男, 博士, 研究员。主要研究方向: 空气动力学及风洞试验技术。
- 孙维(1995-), 男, 硕士研究生。主要研究方向: 图像处理。
- (编辑: 马文静)