

机场环境威胁态势信息在语义空间的 统一建模及其导航应用

朱庆^{1,2} 谭笑^{1,3} 谢林甫¹ 张叶廷¹ 曹振宇⁴

1 武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室,湖北 武汉,430079

2 西南交通大学地球科学与环境工程学院,四川 成都,610031

3 海军工程大学管理工程系,湖北 武汉,430033

4 四川省基础地理信息中心,四川 成都,610041

摘要:面向飞行器导航需求,针对传统空地环境警告信息繁杂导致情境意识薄弱和决策时间长等瓶颈问题,建立了机场环境威胁态势信息在语义空间的统一表示模型,提出了对多源、多尺度、多种分布类型的机场空地环境信息在语义空间的统一建模与动态更新方法,实现了从实时接入的动态观测数据中深度搜索威胁态势信息,并达到信息快速组织与检索的目的。从林芝机场的数据建模和实验结果表明,该方法能精准、高效的建立面向飞行器导航应用的动态机场环境威胁态势图。

关键词:机场环境;语义空间;八叉树索引;可视导航;态势图

中图法分类号:P208

文献标志码:A

影响飞行器安全飞行的 3 大主要因素是地形地物、威胁气象和电磁场干扰。这些因素在机场空地环境中的时空分布中十分复杂,其动态演变规律存在许多不确定性。如何实时接入各种传感器观测信息,实时综合集成分析并为飞行器导航提供及时准确的信息已经成为国际研究的前沿难点问题。

已有的研究主要关注大范围数字地形以及机场设施的 GIS 数据模型及其可视化管理与查询分析应用^[1-2],部分机场 GIS 系统还提供宏观范围的气象信息和机场控制台频率覆盖信息查询等服务^[3]。复杂机场环境威胁态势信息的表示仍然以数值仿真或以地形模拟叠加各种抽象符号为主,并主要集中在局部有限边界的电磁场^[4-5]和气象数据场^[6]的三维建模、渲染^[7-8]和机场环境合成视景^[9-10]等方面。针对实时传感器数据^[11]、动态和静态场数据^[12-14]等类型时空数据的高效组织与调度问题,研究相应的时空数据模型和索引方法。这些研究面向不同的应用领域具有一定代表性,但还缺乏专门面向飞行器导航应用、对机场空地环境各种

要素综合表达的动态三维模型及其表示方法。

本文针对传统空地环境警告信息繁杂导致飞行员的情境意识薄弱和决策时间长的瓶颈问题^[15],面向实时接入的机场空地环境动态时空数据的多源异构、多尺度、多维等特点,统一多维信息的时空基准,并在语义空间实现统一的抽象表达和融合处理,并在此基础上提出了面向飞行器可视导航的时空信息深度搜索算法,实现威胁态势信息的快速提取,动态生成面向飞行器导航的机场环境威胁态势图。

1 威胁态势信息场模型

飞行器运行的高动态性决定了导航信息的表达必须精准、简明。不同语义的威胁信息在数据来源、精度、时空基准、表现形式都不尽相同,威胁态势信息在语义空间的统一表示模型主要体现在以下 3 个方面的统一:① 统一的时空基准,不同环境要素的时空分布和演变规律不同,建立统一的多分辨率三维体素的时空框架;② 统一的语义

收稿日期:2013-11-07

项目来源:国家重点基础研究发展计划资助项目(2011CB302306);国家自然科学基金资助项目(41471320);国家基础测绘科技资助项目(省级应急测绘指挥平台研究与开发)资助项目;四川省测绘地理信息局科技支撑(自然灾害地理信息发布平台关键技术研究)资助项目。

第一作者:朱庆,教授,现主要从事摄影测量、实时 GIS 和虚拟地理环境等方面研究。E-mail: zhuq66@263.net

空间,即将不同语义的威胁信息统一为简明实用的威胁态势等级;③统一的时空计算和可视化表达方法,用高效的体绘制方法来展现威胁态势信息场,并动态计算生成飞行器航路前方3~5 min的“威胁环境态势图”。

机场复杂空地环境信息的语义十分丰富,如

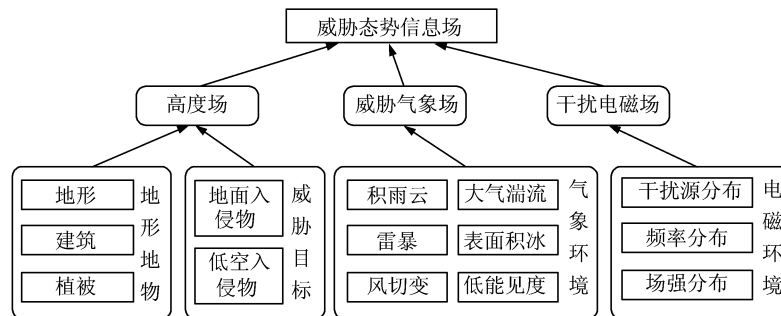


图1 机场复杂空地环境信息的语义及其统一表达

Fig. 1 Semantic of Airport Environment and Its Unified Presentation

机场终端区内地形模型(DEM)、建筑和植被模型对飞行安全而言关注其高程值的分布。而运动的威胁目标,如突然闯入区域内的鸟类或车辆等,分布于低空或地面,传感器监测或预测其运动轨迹和高度数据实时接入场景,和地形地物的高程值共同构成了飞行器不可触碰高度场。

民航气象部门通用的WRF气象数据模式所提供的气象环境数据可以分析计算出风切变、雷暴、大气湍流等威胁飞行安全的气象条件,模拟出机场终端区三维空间内的威胁气象场的分布。空间规则网格点水平分辨率和垂直分辨率分别可达500 m和50 m,数据输出的时间步长最高可达10 min。由此可见,气象场数据为规则的长方体格网数据,采用规则格网索引对数据进行分块组织(图2(a)),可以方便地映射到内存中,实现一维排序,从而支持数据的随机访问与更新。

机场电磁环境建模数据以进近区电磁环境适用状态为主题,包括进近着陆无线电导航台站、空间场强和电磁干扰三个主要要素,每个要素由若干元素和表组成,共同为电磁环境建模的数据基础。如图2(b)所示,电磁环境数据不同于规则格网分布的气象场数据,其空间分布并不均匀,呈扇形分布或无规则分布,因此将电磁数据按多层次八叉树方式组织和存储。

将以上三类不同语义的威胁环境场数据用语义一致的信息模型表达,即三维动态的威胁态势信息场模型(图3),该模型中的每个体元称为体素 v ,每个体素 $v=(D, T, C)$,其中 $D \subseteq R^3$ 是场的空间域,即场占据的三维空间区域(XYZ轴);

图1所示。从威胁飞行安全的角度,将其中地形地物数据、威胁目标的轨迹数据、气象环境数据和电磁环境数据分别抽象为高度场、威胁气象场、干扰电磁场,其共同特征是空间上三维立体分布,时间上动态变化,因此,在语义上进一步统一抽象为“威胁态势信息场”模型。

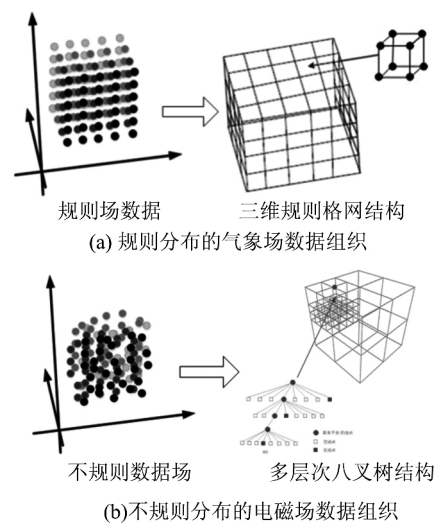


图2 两类场数据组织方式

Fig. 2 Organization of Two Kinds of Field Data

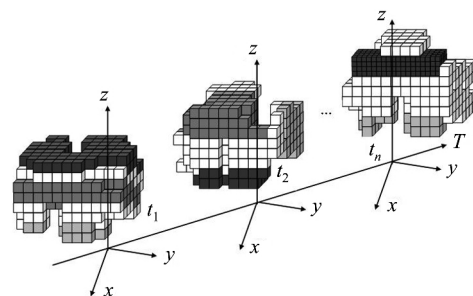


图3 威胁态势信息场模型

Fig. 3 Threat Situation Information Field Model

$T \subseteq R$ 是场的时间域,即场演变过程的时间区间(T轴); C 是体素 v 处的环境威胁等级,即体素颜色。该模型针对高度场、威胁气象场和干扰电磁

场的时空差异、数据接入与实时处理特点,分别采用不同的数据组织方法,然后在语义空间统一为威胁态势等级信息场模型。该模型有利于三维可视化分析与计算,目标是建立简明、可信的用于飞行导航的威胁环境态势图,其关键技术是场数据的高效组织、索引与快速更新。

2 环境数据实时接入与态势场模型动态更新

2.1 实时威胁态势信息场模型的生成

根据前文所述模型建立的原理,实时威胁态势信息场模型的生成算法包括多源数据的实时接入、时空配准和威胁态势计算三个主要功能模块(图 4)。静态要素初始化时加载,此后不需更新,动态要素按照各自更新频率实时接入;时空配准是数据融合和多源数据统一管理表达的基础,包括时间匹配和空间配准;威胁态势计算则是根据专业模型,在动态观测数据中进行威胁态势信息的实时提取。

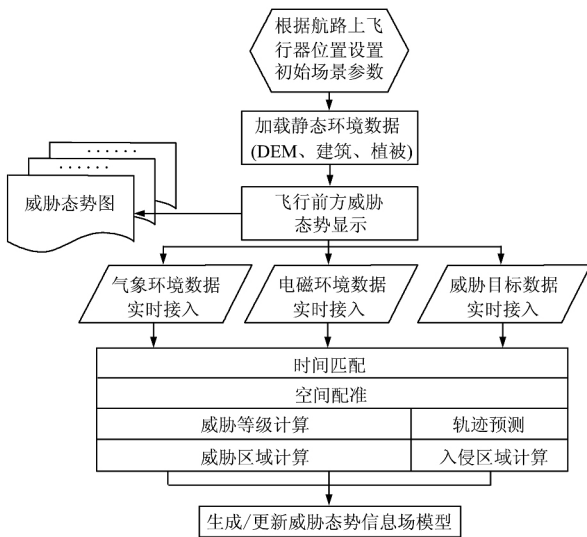


图 4 实时威胁态势信息场模型的生成流程图
Fig. 4 Flow Chart of Realtime Threat Situation Information Field Modelling

2.2 三维动态格网数据的时空配准

多源数据采样的时间频率、空间分辨率不一,因此首先要对这些观测数据进行时空配准。包括时间上建立统一的时间基准和时间步长,空间上确立统一的三维格网分辨率。

如图 5(a)所示,动态环境数据 E_1 和 E_2 的开始采样时间分别为 t_1 和 t_2 ,时间步长分别为 $step_1$ 和 $step_2$,建立统一的动态威胁态势场 S 的时间基准 $t_s = \min(t_1, t_2)$,时间步长 $step_s = \min(step_1,$

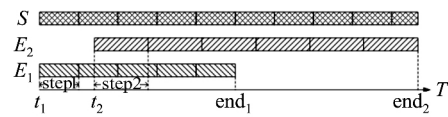
$step_2)$,时间区间 $T_s = T_1 \cup T_2$ 。

空间上三维格网配准首先建立框架格网,对于框架点以外的数据点,则采用合适的数学模型内插到框架点,从而得到统一框架点的特征值(图 5(b))。经常采用的模型有协方差推估模型、多元回归模型、加权平均模型等。

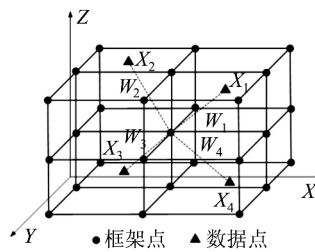
加权平均模型是一种比较常见的数学模型,而且形式简单,易于理解,在许多领域得到应用。对于每个数据点根据其与中心点的距离而分配相应的权,离中心点越近的数据点占得权重就越大,对中心点的影响也越大。其一般形式的计算公式为:

$$X = \frac{\sum_{i=1}^n \omega_i x_i}{\sum_{i=1}^n \omega_i}$$

式中, X 是中心点处的计算值; x_i 是数据点的特征值; ω_i 是该已知数据点对应的权,一般取距离平方的倒数。



(a) 统一时间基准和步长



(b) 三维格网数据配准

图 5 三维动态格网数据的时空配准

Fig. 5 Spatio-temporal Registration of 3D Dynamic Grid

2.3 动态数据实时接入与威胁态势分析

面向飞行器导航的机场环境数据的处理具有极强的实时性,危险气象环境信息的接入和更新达到 10 min 一次,电磁信息的接入和更新时间达到秒级,这就要求对动态数据接入和机场环境威胁态势信息的在线分析时间分别达到分钟级和秒级。

2.3.1 地面威胁态势计算

机场地面环境数据包括飞行器航路上和机场终端区周边的地形地物和突然入侵的运动目标。地面环境威胁态势计算是根据飞行器的航线路径和飞行参数,计算出进近区间的地表高度、机场区域障碍物高度、机场跑道入侵物识别与轨迹判断,得到两类威胁态势区域:可航区域和不可航区域。

2.3.2 气象环境威胁态势计算

气象环境威胁态势计算是在与地理数据一致的时空基准内,分析出实时接入的气象场数据中的威胁区域和安全区域。本文以对飞行器安全进近有较大影响的风切变为例,计算衡量风速随高度变化的指标——风切变指数 α ,来判断某一区域风切变的强度:

$$\alpha = \lg\left(\frac{V_2}{V_1}\right) / \lg\left(\frac{Z_2}{Z_1}\right)$$

式中, V_1 、 V_2 分别为高度 Z_1 、 Z_2 出的风速大小。

对于可能发生风切变的气象条件,民航气象部门每 10 min 接入一次气象数据,根据判断风切变的两个阈值:垂直方向上距离为 30 m 的两个点风速差大于 2 m/s 和 6 m/s,可将风切变因素造成的威胁态势分为 3 个等级。

2.3.3 电磁环境威胁态势计算

机场终端区电磁环境建模数据以进近着陆电磁环境适用状态为主题,包括进近着陆无线电导航台站、空间场强和电磁干扰等 3 个要素,每个要素由若干元素和表组成,共同为电磁环境建模提供基础数据支持。以一定区域地理数据和气象数据为背景,电磁环境信息描述为 (x, y, z, f, E) ,即空间坐标、频率、场强(功率密度),其中,进近着陆台站运行覆盖区内接收点 p 处的电磁信号场强可表示为:

$$E(p) = \sum_{n=1}^N E(p_n)$$

式中, N 为到达接收点 p 的射线总数, $E(p_n)$ 为第 n 条到达接收点射线的场强矢量。

在没有电磁干扰的情况下,按照每个点的场强值 $E(p)$ 与信号场强阈值的关系,将电磁环境状态分为 4 个等级;在有外部电磁干扰源的情况下,根据干扰源的位置和频率,以及干扰源和导航信号之间的数值关系,可判断飞行器在某点是否受到干扰。

2.4 威胁态势信息场模型的动态更新

多种类型的机场空地环境信息统一表示为威胁态势信息场,表达出空间中各点的威胁态势等级,从而简化了导航信息。但飞行器高速运动的特点决定了辅助导航决策的信息不仅要简明表达,而且要实时更新,保持内存中存储最新的威胁环境态势信息。数据融合后的威胁态势信息场是不规则分布的数据场,因此,需要用多层次八叉树来组织和更新。在内存中只更新两个时态之间威胁态势等级发生变化的区域,从而能够较大提高更新速度,实现算法如图 6 所示。

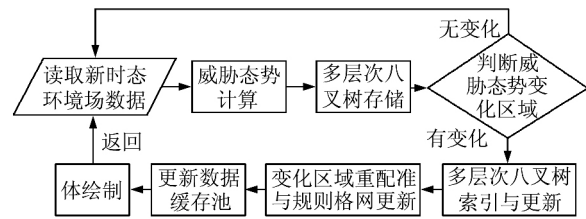


图 6 动态数据更新算法流程

Fig. 6 Flow Chart of Data Update Algorithm

如图 7 所示,该威胁态势信息场共有约 1 620 万不规则分布的离散点,分别用顺序遍历、格网索引和多层次八叉树索引做更新不同数量的离散点的实验。从图中可以看出,在更新数据量较大的情况下(点数超过 1 000 万),规则格网和多层次八叉树的数据组织和索引方法优于遍历方法更新,能够较为明显的提高离散点的调度和更新的效率,且数据量越大,效率优势更为明显。因此,规则格网索引适用于前文所述的经过时空配准后的态势场数据的更新,而多层次八叉树索引更适合于配准前不规则分布的多源环境数据的动态调度和快速更新。

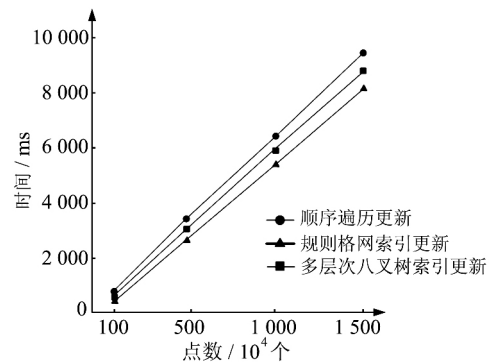


图 7 威胁信息场模型更新效率曲线

Fig. 7 Update Efficiency Threat Situation Information Field Model

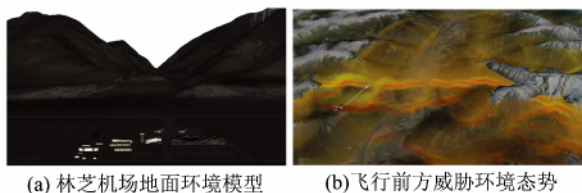
3 威胁环境态势信息实时分析及导航应用

3.1 典型机场的导航应用实例

林芝机场是我国西部地区典型的高原复杂环境机场,机场位于林芝地区米林县境内的雅鲁藏布江河谷,周围是海拔 4000 多米常年被云雾笼罩的高山峻岭,机场多低云天气,风向多变并伴有风切变等复杂气象环境,是本文提出的复杂机场终端区建模方法所适用的典型机场实例。

图 8(a)为林芝机场地面环境模型,是机场终端区的复杂地理环境信息的再现。图 8(b)是飞行器抵达林芝机场终端区后,飞行前方的威胁态

势。结合航线信息对三维体素模型进行剖分,来进一步判断飞行器航线前方是否安全,是否需要临时修正航线,以规避危险。



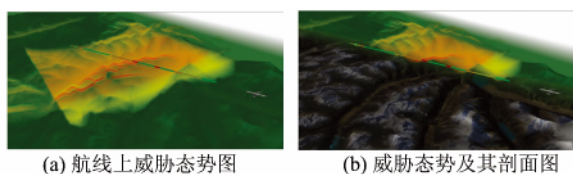
(a) 林芝机场地面环境模型 (b) 飞行前方威胁环境态势

图8 林芝机场导航应用实例

Fig. 8 Navigation Application of Linzhi Airport

3.2 基于“威胁态势图”的实时分析

实时的空地环境场景模型并不能直接用于指导飞行员或地面导航台站进行导航指挥,必须对空地环境场景进行抽象和简化。本文提出的“威胁态势图”的定义是:飞行器航路前方3~5 min飞行距离上的三维空间威胁态势,用清晰、简明的颜色表示威胁等级。图9表达了林芝机场进近航线上的威胁态势信息场及其剖面图。在此基础上,可对该信息模型进行可视化的缓冲区分析、剖面分析以及信息查询等实时分析操作。



(a) 航线上威胁态势图 (b) 威胁态势及其剖面图

图9 飞行器航路前方的“威胁态势图”

Fig. 9 Threat Environment Situation Map of Airline

4 结 语

本文分析了对飞行器安全进近造成影响机场环境因素,针对这些环境因素多源、动态的特点,提出了实时威胁态势信息模型,在语义空间上进行了统一表达和建模,并对我国典型的高原复杂环境机场——林芝机场进行了导航应用实例研究,得出如下结论。

1) 本文提出的在语义空间上对多源异构的机场环境信息进行建模和统一表示,进而构建简明的威胁态势信息模型,是机场环境建模应用于飞行器进近导航的前提。

2) 环境数据的实时接入和动态更新,即数据的高效组织与调度是机场环境建模的关键技术问题,这关系到海量环境数据能否实时转变为供飞行器导航可用的威胁态势信息,实验证明,本文提出的数据组织和索引方法是可行、高效的。

3) 威胁态势图是信息模型的直观表达和最终生成的可视化产品,它的可视化方法和输出形式还需要结合民航部门的实际应用来进一步完善。

参 考 文 献

- [1] Liu Kunliang, Zhang Dakun. Research on Key Technology of Airport Simulation Based on OSG [C]. 2010 International Conference on Mechatronics Engineering and Automatic Control (ICEEA 2010), San Francisco, USA, 2010
- [2] Panayotov A, Georgiev I, Georgiev I. A Practical Approach for Airport Spatial Modeling [C]. Proceedings of the 13th International Conference on Computer Systems and Technologies, Ruse, Bulgaria, 2012
- [3] Chen Yan. Research on Airport-Oriented Aviation Safety Information System [J]. *Computer Applications and Software*, 2012, 29(7): 46-49 (陈燕. 面向机场的航空安全信息系统研究 [J]. *计算机应用与软件*, 2012, 29(7): 46-49)
- [4] Dai Chuanjin, Wu Dewei, Zhao Xiubin, et al. Modeling and Simulation for Electromagnetic Environment of the Approaching Landing System for Aeroplane [J]. *Aeronautical Computing Technique*, 2008, 5(1): 42-46 (戴传金, 吴德伟, 赵修斌, 等. 飞机进近着陆系统电磁环境建模与仿真 [J]. *电光与控制*, 2008, 5(1): 42-46)
- [5] Zhang Xianhao, Xiang Shuoling, Zhuang Xia. Simulation Study on Electromagnetic Environment of Airport Terminal Area [J]. *Journal of Civil Aviation Flight University of China*, 2013, 24(2): 17-19 (张先浩, 向硕凌, 庄夏. 机场终端区域电磁环境仿真研究 [J]. *中国民航飞行学院学报*, 2013, 24(2): 17-19)
- [6] Zhuang Zibo, Jiang Lihui, Xiong Xinglong. Numerical Simulation of Wind Fine Structure Around Airport Terminal Area [J]. *Journal of System Simulation*, 2013, 25(1): 30-35 (庄子波, 蒋立辉, 熊兴隆. 机场终端区风场精细结构的数值模拟研究 [J]. *系统仿真学报*, 2013, 25(1): 30-35)
- [7] Lv Zheng, Sui Haigang, Zhang Xilin, et al. Automatic Updating and 3D Modeling of Airport Information from High Resolution Images Using GIS and LiDAR Data [C]. Proc SPIE 6790, MIPPR 2007: Remote Sensing and GIS Data Processing and Applications; and Innovative Multispectral Technology and Applications, Wuhan, 2007
- [8] Wang Liwen, Zhou Zhinan. Research on Parametric Modeling of Airport Virtual Scenes [J]. *Computer*

- Engineering & Science*, 2011, 33(8):95-101(王立文,周智楠. 机场视景模型参数化建模方法研究[J]. 计算机工程与科学, 2011, 33(8):95-101)
- [9] Prinzel L J, Kramer L J. Synthetic Vision System [J]. *Transportation Research*, 2009(8):1-14
- [10] Glorol L, Calhoun, Mark H, et al. Synthetic Vision System for Improving Unmanned Aerial Vehicle Operator Situation Awareness[C]. Proceedings of SPIE Enhanced and Synthetic Vision, Bellingham, WA, 2005
- [11] Servigne S, Noel G. Real Time and Spatiotemporal Data Indexing for Sensor Based Databases, Geospatial Information Technology for Emergency Response [M]. London: Taylor & Francis Group, 2008: 123-142
- [12] Lv Guangxian, Pan Mao, Wang Zhangang, et al. Study of Virtual Octree Model for Volume Data[J]. *Computer Applications*, 2006, 26(12): 2 854-2 855 (吕广宪,潘懋,王占刚,丛威青. 面向体数据的虚拟八叉树模型研究[J]. 计算机应用, 2006, 26(12): 2 854-2 855)
- [13] Huang Fengru, Fang Yu, Chen Bin, et al. Continuous and Discrete Dynamic Fields Integrated Model and Its Database Extension[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2007, 43: 738-743(黄凤茹, 方裕, 陈斌, 等. 连续和离散统一的动态场模型扩展研究[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2007, 43:738-743)
- [14] Gong Jun, Xie Xiao. Three-Dimension Visualization Query Method Based on R-Tree[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2011, 36(10):1 135-1 139 (龚俊, 谢潇. 基于R树索引的三维可视化查询方法. 武汉大学学报·信息科学版, 2011, 36(10):1 135-1 139)
- [15] Chen Dexian. Research on Risk Management Theory and Technology Under the Condition of RNP Operation at the Plateau and Complex Airports [D]. Guanghan: Flight Technology College, Civil Aviation Flight University of China, 2004(陈德贤. 高原复杂机场 RNP 运行条件下风险管理理论与技术研究[D]. 广汉:中国民用航空飞行学院, 2004)

The Threat Situation Information Field Model and Application for Airport Environment

ZHU Qing^{1,2} TAN Xiao^{1,3} XIE Linfu¹ ZHANG Yeting¹ CAO Zhengyu⁴

¹ State Key Laboratory of Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing, Wuhan University, Wuhan 430079, China;

² Faculty of Geosciences and Environmental Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu, 610031, China;

³ Department of Management Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China

⁴ Sichuan Geomatic Center, Chengdu 610041, China

Abstract: Aimed at meeting aircraft navigation requirements such as a lack of the air-ground environment warning and the difficulty of decision-making, this paper considers the Threat Situation Information Field Model for Airport Environment. It puts forward modeling and updating methods using multi-source, multi-scale, multi-distributed data for analyzing threat situation information from real-time connection data, fulfilling fast data indexing needs. The experimental modeling results for Nyingchi Airport show that a dynamic threat environment situation map can be built accurately and efficiently with this method.

Key words: airport environment; semantic; octree index; visual aircraft navigation; situation map

First author: ZHU Qing, professor, PhD, specializes in digital photogrammetry, real-time GIS, virtual geographic environment. E-mail: zhuq66@263.net

Foundation support: The National Basic Research Program of China, No. 2011CB302306; the National Natural Science Foundation of China, No. 41471320; the National Basic Mapping Technology Projects (Research and Development on Provincial Command Platform of Emergency Mapping and Surveying); the Technology Support Projects of Sichuan Surveying and Mapping Geographic Information Bureau (Key Technology Research on Geoinformation Publishing Platform for Natural Disasters).