

地物背景战场环境红外图像实时生成技术

张作宇¹, 廖守亿¹, 于功健¹, 苏德伦^{1,2}

(1. 第二炮兵工程大学控制工程系, 陕西 西安 710025; 2. 解放军 96111 部队, 陕西 韩城 715400)

摘要: 基于逼真战场环境开展半实物仿真试验是对红外成像制导系统进行测试和评估的有效途径, 其中地物背景战场环境红外图像实时生成技术是模拟真实战场环境红外特性的关键技术之一。首先介绍了基于电阻阵列的战场环境红外仿真系统的组成; 然后从工程实用性出发, 以卫星地图为数据源, 采用 Terra Vista 对目标区域进行地形建模, 利用 SensorVision 红外模块对目标区域进行红外辐射特性建模以生成目标地区红外图像, 并提出了加快图像渲染速度和增强图像真实性的优化方案; 最后基于 VC 环境编写了地物背景战场环境红外图像实时生成与测试软件。仿真测试结果表明, 该方法能够满足战场环境仿真系统红外图像实时生成的要求, 效果良好且易于工程实现。

关键词: 红外图像生成; 半实物仿真; SensorVision; Terra Vista; 地物背景

中图分类号: TP391.9 文献标识码: A 文章编号: 1001-8891(2015)08-0642-06

Real-time IR Image Generation Technology of Terrain Background Battlefield

ZHANG Zuo-yu¹, LIAO Shou-ji¹, YU Gong-jian¹, SU De-lun^{1,2}

(1. Department of Control Engineering, the Second Artillery Engineering University, Xi'an 710025, China;
2. 96111 Army of PLA, Hancheng 715400, China)

Abstract: Hardware-in-the-loop simulation experiment based on the realistic battlefield simulation is an effective way to realize the performance test and evaluation of IR imaging guidance system, while real-time IR image generation technique of terrain background battlefield is one of the key technologies to simulate the infrared character of real battlefield. First, the design of a battlefield IR simulation system is introduced. Then, to enhance the engineering practicability and generate infrared image of target area, the satellite map is used as the data source, Terra Vista is used to model the target region, and SensorVision module is used to simulate the infrared character of target region. Also, the method to speed up the image rendering and enhance the image authenticity is introduced. Last, the software of real-time IR image generation and test is written under VC development environment. The results indicate that the solution can meet the battlefield IR simulation system's requirements of real-time, good effect and engineering practicability.

Key words: IR image generation, hardware-in-the-loop, SensorVision, Terra Vista, terrain background

0 引言

在红外成像制导系统的研制过程中, 需要大量的试验来对系统进行测试和评估, 而常规的外场靶场试验价格高昂, 费时费力, 风险大。在试验鉴定过程中, 也由于对未来真正的战场环境缺乏清楚的认识或者由于复杂、苛刻、极端的真实战场环境难以构建, 导致对环境适应性及抗干扰能力等指标的考核难以实施。此外, 在作战使用过程中, 复杂战场环境使得红外成像制导武器面临越来越大的挑战, 尤其是云、雨、雪、雾、风、雷、电等天气因

素, 人为主动干扰因素和地物背景因素等, 使得红外成像制导系统的作战效能大打折扣, 在作战使用过程中面临极大的挑战。

解决上述问题最直接的手段是提高红外成像制导系统的环境适应能力和抗干扰能力, 但这需要较长的时间来攻关实现, 短时间之内可能难以有所突破。另一条途径是基于逼真战场环境模拟构建战场环境红外仿真系统并开展半实物仿真以对红外成像制导系统进行效能评估, 这是西方发达国家特别是美国、英国、以色列、澳大利亚、加拿大等国普遍采用的做法。战场环境红外仿真系统的构建主要包括

收稿日期: 2015-04-11; 修订日期: 2015-06-15。

作者简介: 张作宇 (1992-), 男, 河南信阳人, 硕士研究生, 研究方向为导航、制导与控制。

基金项目: 中国博士后科学基金, 编号: 2012M512150。

含两部分内容:一是战场环境红外图像实时生成,包括地物背景、云、灰尘、烟幕等各种干扰的生成;二是红外图像实时投射,即将红外图像投射成热图像,从而为红外成像制导系统提供逼真的战场环境场景。而常用的红外景象投射装置主要有红外CRT、DMD和电阻阵列等^[1],其中电阻阵列由于技术较为成熟是目前最常用的投射装置^[2],国内也已经研制成功了 256×256 电阻阵列且已得到工程化应用,并正在向 512×512 扩展。

目前,国内关于红外图像实时生成技术已经展开了大量研究,主要分为两大类,一类是利用OpenGL、开源渲染引擎等进行红外图像的渲染,图像渲染质量可控性好,但开发很难,通用性较差,目前国内还未见比较成熟的软件产品公开报道。另一类是基于国外商用软件进行渲染,开发相对容易,但图像质量可控性不强,也未见有工程化应用的例子报道和产品出现。

针对复杂地物背景的红外图像生成问题,也有学者通过地物反演、纹理材质分类、红外辐射特性计算、图像生成等环节加以实现^[3],方法类似于第一类方法,但建模仿真过程要大量的人为干预和操作过程,难以实现图像的快速生成建模,且尚未有工程化应用方面的报道。

由于地物背景具有范围广、信息量大等特点,使用传统方法很难对其进行快速的红外辐射特性建模与图像生成。因此,本文通过借鉴地理信息系统领域相关技术,研究利用卫星遥感地图对真实地物背景战场环境进行快速红外建模的方法,取得了较好的效果,为构建战场环境红外仿真系统提供了关键技术支撑。

1 基于电阻阵列的战场环境红外仿真系统

基于电阻阵列的战场环境红外仿真系统主要由地物背景战场环境红外图像生成系统、驱动控制器、实时传输网络、电阻阵列及光学系统组成^[4],如图1所示。

战场环境红外仿真系统的工作过程为:图形工作站CPU将由图形显卡渲染的红外图像经非均匀性校正^[5]、DA校正后转化成电压数据写入反射内存,驱动控制单元由PCI104总线读取反射内存中的电压数据并通过总线将电压数据传递给驱动控制卡,驱动控制卡根据时序输出电阻阵列各单元的驱动电压^[6],由电阻阵列内的扫描控制单元完成扫描驱动从而实现红外图像的投射。当战场环境红外仿真系统处于闭环半实物仿真工作模式时,图形工作站CPU通过反射内存接收由仿真计算机发送的弹

目相对位姿信息,供战场环境红外图像生成系统生成红外成像制导系统入瞳处的红外图像。

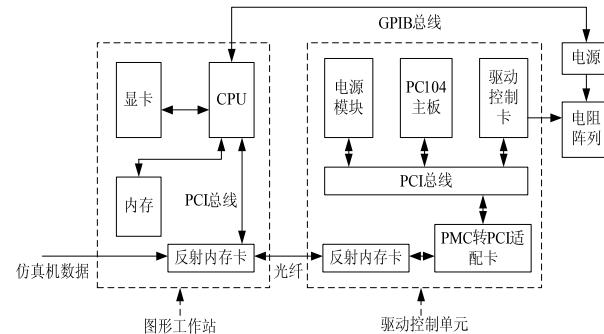


图1 战场环境红外仿真系统结构框图

Fig.1 Structure diagram of the battlefield IR simulation system

基于国产电阻阵列发展现状,对图像生成系统的指标要求为:①图像生成帧频为200 Hz;②像元规模为 256×256 。

2 地物背景战场环境红外图像生成方法与关键技术

2.1 总体技术方案

对于防区外远程打击红外成像制导武器,由于很难获得目标区域的红外图像,而只能通过侦察手段获得可见光遥感图像,因而可根据遥感图像来进行红外图像的生成。因此,红外图像的生成步骤主要分数据准备、地形建模、红外辐射特性建模3个阶段。具体方案如图2所示。

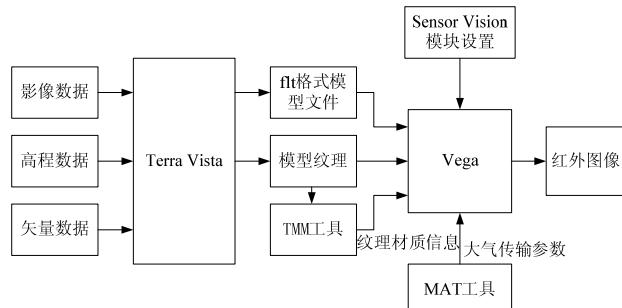


图2 红外图像生成总体技术方案

Fig.2 Technical solution of IR image generation

首先,将目标地区的影像数据、高程数据、矢量数据导入到Terra Vista工程中,利用Terra Vista对目标地区进行三维地形建模^[7]。然后,利用MAT(MOSART Atmospheric Tool)工具对大气传输效应进行建模,利用TMM(Texture Material Mapper)工具对模型纹理进行材质映射,并在Lynx面板上对SensorVision模块进行设置。最后,利用Vega渲染产生红外图像。

Terra Vista是Presagis公司开发的Windows平

台下专门应用于处理高精度大面积地形数据的实时三维复杂地形数据库生成软件。Vega 是由 Multigen-Paradigm 公司开发的商用实时可视化三维视景仿真软件系统, Vega 可选模块 SensorVision 的集成,使得 Vega 可以仿真出包括可见光和红外波段下传感器观察虚拟场景的图像效果, Vega 及其 SensorVision 模块是目前国内常用的红外辐射特性建模工具。

2.2 数据准备

2.2.1 遥感影像数据

要获得目标地区真实详细的地理文化信息,就需要较高分辨率的遥感影响数据。遥感影像数据可由飞机航拍、卫星拍照等途径获得。当前,卫星遥感图像已经进入一个高分辨率、高精度、低费用的时代,且很多地图公司都公开其部分卫星遥感图像,如谷歌地图、微软 Bing Maps 等。俄罗斯的 SAS Planet 软件是一款专用的地图下载软件,可下载谷歌、微软、雅虎等多家公司发布的卫星遥感图像,使用方便。

2.2.2 地形高程数据

三维场景必须充分反映出目标地区高低起伏的地形信息,因此还需要目标地区的高程数据。高程数据一般可由等高线插值转换或高程数据库来获得。世界许多发达国家都有其高程数据库,如美国太空总署 (NASA) 发布有免费的 SRTM 和 ASTERGDEM 全球数字高程数据。其中, SRTM 分辨精度达到 90 m, ASTERGDEM 则达到 30 m。可以利用 Global Mapper 软件直接下载这两种数据,也可从网站中获得。

2.2.3 文化矢量数据

遥感影像数据和地形高程数据描述了目标地区宏观的地形地貌。要表现出目标地区微观具体的房屋、道路、湖泊等文化信息,就需要获得目标地区的文化矢量数据。文化矢量数据可以根据遥感影像数据进行手动制作。Terra Vista 可自行创建矢量数据文件并对其进行编辑,但 Terra Vista 中的矢量编辑工具较为简单,使用不太方便。Arc Map 软件是编辑矢量地图数据的专业软件,拥有较为全面的矢量编辑工具,功能强大。因此可采用 Arc Map 软件来预先创建矢量数据,然后将矢量数据导入 Terra Vista 中。

2.3 地形建模

2.3.1 数据导入

数据导入是将遥感影像、地形高程、矢量数据、自定义三维模型和纹理等数据导入到 Terra Vista 项目中的一个过程。Terra Vista 支持同一类型数据的多种数据格式,导入时将遥感影像和地形高程数据

转化为 ecw 图形格式,将矢量数据转化为 vec 矢量格式。导入后的遥感影像、地形高程和矢量数据在项目根节点下的 Source Data Library 节点中,通过 Terra Vista 的 Thumbnail 窗口可以对这些数据进行显示和编辑。导入的三维模型在 Model Library 节点中,在 Culture Parameters 节点下可以找到该模型对应的文化信息参数。

2.3.2 地形参数设置

地形参数设置是影响地形生成的精确度、大小和实时性的重要因素。地形参数设置包含多个方面,如投影方式、Gaming Area 大小、应用类型、运行环境、数据库参数、文化模型等。其中, Gaming Area 决定了所生成地形的覆盖范围,设置时需要让 Terra Vista 自动计算;应用类型指定了地形的应用背景,如陆地漫游或高空飞行等;数据库参数指定了生成地形的区块大小、LOD 层数和多边形数量。Terra Vista 集成了地形参数设置向导 Interviewer, 用户可以集中地在该向导中进行地形参数设置。

2.3.3 矢量赋值与修正

矢量数据编辑是进行地形建模最为复杂和重要的工作。矢量数据的质量直接影响生成地形的逼真度和复杂度。将矢量数据导入后,还需要对这些矢量赋予特定的属性,这样 Terra Vista 在生成地形时才会将这些矢量表现为不同的三维实体。Terra Vista 提供常用的点、线、面矢量的建模模板,如点模板有房屋、树木、标志牌等,线模板有河流、公路、电线杆等,面模板有湖泊、森林、居民区等。用户也可以自己创建矢量模板,如可以将三维模型导入, Terra Vista 就会自动生成与其对应的点模板。在项目根节点下 Culture Parameters 节点内,用户可以根据自己需要修改矢量模板,如更改纹理、尺寸等。

2.3.4 地形生成

以上工作完成后,就可以生成地形了。在 Thumbnail Editor 中选定所要生成的目标区域,在 Interviewer 工具中设置输出格式为 OpenFlight 格式或 Terra Page 格式,然后编译项目 Terra Vista 就会自动生成目标区域对应的地形模型。为加快调试进度,用户可对有改动的区块进行单独编译。在 Published Output 节点内,用户可利用 Terra Vue 工具对生成的地形模型进行预览。

2.4 红外辐射特性建模

2.4.1 大气传输效应建模

大气的作用会使到达红外探测器的红外辐射产生衰减。因此必须对目标地区的大气传输效应进行建模,以此来模拟实际大气的影响。利用 Vega 中 MAT 工具预生成所设置大气状况的计算参数并保存为 mat 文件,该文件可直接用于 Vega 红外实时

仿真中的大气传输计算。在 MAT 工具中, 分别需要设置大气状态、大气定量参数、光谱带宽、热传递参数等数据。其中, 在光谱带宽中指定红外波段参数即可在 Vega 中产生红外传感器效果。

2.4.2 纹理材质映射

不同的材料即使在相同的温度下也会表现出不一样的辐射亮度。因此需要对场景中物体的表面指定相应的材质。Vega 提供 TMM 工具通过纹理材质映射来描述物体表面的材质信息, 拥有 159 种不同的材质可供用户选择。纹理材质映射是一个较为复杂的工作, 必须为场景中的所有模型纹理指定材质, Vega 才能正确地计算出场景中的物体表面辐射亮度。纹理材质映射准确与否将会影响 Vega 计算物体表面红外辐射的真实性。TMM 工具输出格式为 tmm 文件, Vega 的 SensorVision 模块在运行时会自动调用物体表面的材质信息。

2.4.3 SensorVision 模块设置

利用 Vega 的 Lynx 面板将地形模型载入后, 还需要设置 SensorVision 面板属性。在 SensorVision 面板中主要设定辐射计算解决方案、日月位置、大气质量、转换因子等参数。其中转换因子是由辐射亮度转化为红外图像像素灰度值的系数, 其计算公式如下:

$$c = I \cdot \text{cov}$$

式中: c 为像素灰度值; I 为辐射亮度; cov 为转换因子。

经以上工作, 就可以利用 Lynx 面板上的 Active Preview 工具直接预览红外图像或在程序中调用 Vega 和 SensorVision 模块来生成红外图像。

2.5 复杂地物背景战场环境红外图像生成关键技术

2.5.1 模型优化

三维模型中的多边形数量是影响模型渲染速度的重要因素。而如果模型中多边形数量较少, 模型的逼真度又会受到影响。因此, 必须采取合适的建模方法在保证模型一定逼真度的前提下尽量减少其多边形数量。地物背景战场环境中包含较多的地理信息, 如房屋、河流、公路、树木等, 因此为在地形模型中充分地展示出这些地理信息且实现较少的多边形数量, 本文提出了一种基于目标位置的模型优化方法。

以距离目标远近为标准, 在较远的地区, 采用平面纹理进行建模; 在中等距离的地区, 只对地形进行建模而不对文化信息进行建模; 在距离目标较近的地区, 对地形和文化信息都进行建模, 但建筑物采用 Terra Vista 的建筑物自动生成器进行建模, 即将建筑物近似为长方体。而在目标附近, 进行地形和文化信息高逼真度建模, 其中较为重要的建筑

物先利用 Creator 建模软件对该建筑物进行单独建模, 再将其模型导入到 Terra Vista 中。

此外, 在 Terra Vista 中还可设置区块多边形数量、纹理大小、LOD 层数等模型生成参数。通过调整这些参数也可以达到减少多边形数量提高模型渲染速度的目的。

2.5.2 高效逼真的纹理材质映射

由于战场环境的地形建模过程中, 会产生较多的纹理数据, 特别是 LOD 层数较多时, 地形纹理会成倍增加, 这无疑给纹理材质映射工作带来了很大的不便。为解决这个问题, 可以考虑根据卫星遥感图像制作全矢量地图, 即采用不同属性的面矢量覆盖整个地形表面。这样不仅减少了地形纹理的数量, 还增加了地形纹理的清晰度, 同时模型的渲染速度也会得到提高。

纹理材质映射工作是一项技巧性工作。TMM 工具提供多种选择工具用来对纹理图片上的像素或区域进行选择。如矩形框选择工具, 对圈定的矩形框进行选择; 索套选择工具, 对圈定的任意形状进行选择; 相似像素选则工具, 能对整个纹理范围内的一定阈值颜色范围的像素进行选择。要合理地利用这些工具来对纹理图片上的像素进行材质映射。当纹理图片较为复杂但颜色分明时, 可先利用相似像素选择工具来指定多种相似像素的材质, 然后利用 Smart Create 功能完成全部像素的材质映射。当纹理图片区域分明时, 则可用区域选择工具对各个区域整体指定纹理材质。

3 仿真验证与测试

3.1 某岛屿部分区域红外图像实时生成

首先, 利用 SASPlanet 软件下载某岛屿部分区域 $3.7 \text{ km} \times 2.4 \text{ km}$ 约 9 km^2 面积 0.46 m/pixel 分辨率的 Bing Maps 卫星遥感图像并保存为 ecw 格式, 如图 3 所示。用 Global Mapper 软件载入该图像, 下载相应区域 SRTM 高程数据并保存为 GeoTIFF 格式, 如图 4 所示。在 ArcMap 软件中载入卫星图像, 根据图像手动绘制矢量, 如图 5 所示, 矢量数据保存为 shp 格式。

然后, 将该区域的卫星遥感图像、高程数据、矢量数据载入到 Terra Vista 中。利用 Interviewer 工具对项目进行设置, 将整个目标区域分为 6 个区块, 每个区块包含多边形数量 1024 个, LOD 层数为 2 层。利用矢量编辑工具对矢量进行赋值和修正, 编译以生成地形。利用 Creator 查看所生成的地形模型, 如图 6 所示。

最后, 利用 MAT 工具配置大气传输文件, 设置

大气模型为温带夏天,风速为中等,湿度中等,响应波段为中波 $3\sim5\mu\text{m}$ 。利用TMM工具对地形模型的所有纹理制作纹理材质映射文件。利用Lynx面板配置Vega和SensorVision参数,设置场景更新温度方式为自动,转换因子为1500。利用Active Preview工具查看,视场角 $60^\circ\times60^\circ$,如图7所示,其中(a)图为不添加传感器效果,(b)图为添加传感器效果。

为模拟导引头视场,更改视场角为 $5^\circ\times5^\circ$ 。如图8所示,(a)图是视点距目标地区9 km,高度750 m观察目标地区的红外图像;(b)图是视点距目标地区2.7 km,高度100 m观察目标地区的红外图像。

3.2 性能测试

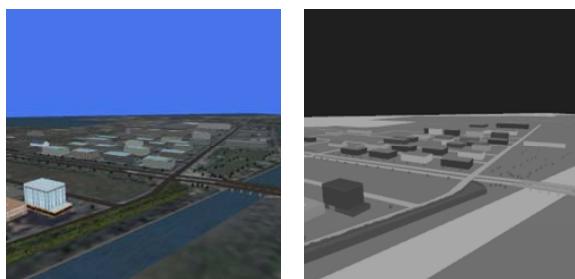
考虑到基于电阻阵列的战场环境红外仿真系统对红外图像实时生成的要求,利用VC开发工具编写了红外图像实时生成与测试软件,如图9所示。该软件通过载入Lynx文件来配置和运行Vega,其Vega窗口大小设置为 256×256 ,运行时显示当前



图3 卫星遥感图像
Fig.3 Satellite remote sensing image



图5 矢量数据
Fig.5 Vector data



(a) 不添加传感器效果 (b) 添加传感器效果

图7 Vega添加传感器效果前后对比图

Fig.7 The comparison before and after adding sensor effect in Vega

帧频和帧耗时并将帧耗时写入txt文件中保存。该软件运行时所计算的帧耗时为Vega渲染一帧图像与将该帧图像数据从显卡读到内存中所用时间的总和。在惠普Z820图形工作站上运行该软件,使大部分目标区域能够在窗口中得到渲染,测得帧耗时如图10所示。该图形工作站的性能参数为:操作系统Windows 7 64位;CPU Intel Xeon E5-2609 4核2.4GHz;显卡NVDIA Quadro K5000;内存4GB。

由以上结果可以看出,在商用图形工作站上渲染该地物背景,图形工作站完全能够在5 ms内完成红外图像生成工作。故采用该方法生成地物背景红外图像能够满足战场环境红外仿真系统图像生成要求。

任何仿真结果人们首先都会关心其可信度,对于图像生成来说,人们会关心生成的图像是否逼真、是否和实际情况一致的问题^[8]。影响本文生成图像逼真度和准确性的因素主要包括:三维地形建模的

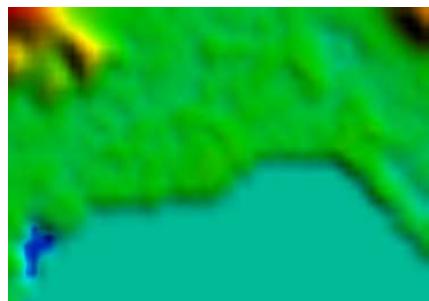


图4 高程数据
Fig.4 Elevation data

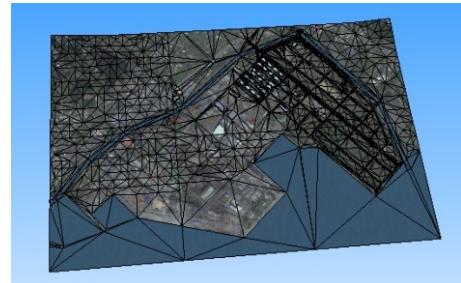
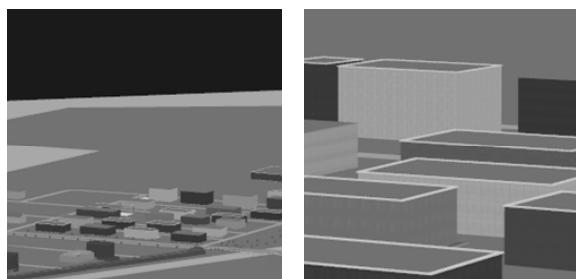


图6 地形模型
Fig.6 Terrain model



(a) 距离9 km, 高度750 m (b) 距离2.7 km, 高度100 m

图8 $5^\circ\times5^\circ$ 视场角不同位置观察目标地区

Fig.8 The effect of observing the target area in different positions with $5^\circ\times5^\circ$ viewing angle

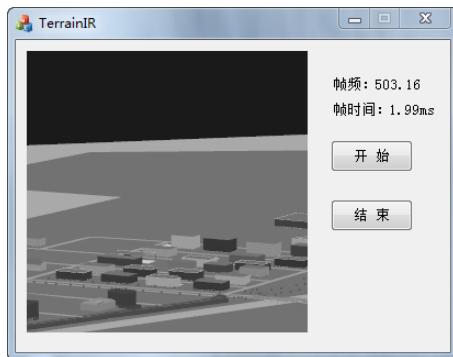


图9 红外图像实时生成与测试软件

Fig.9 Real-time IR image generation and test software

准确性、红外辐射计算的准确性和大气传输计算的准确性,其中三维建模的准确性根据仿真的需求,可以做到比较精确,而后两者涉及到 SensorVision 模块对红外辐射和大气传输解算的准确性。澳大利亚 Ninh T. Duong 开展了 SensorVision 生成红外图像的可信度评估工作,得出的结论是^[9]: 在澳大利亚地区使用 SensorVision 进行红外图像生成,影响其可信度的主要因素是大气环境数据库,如果采用 SensorVision 自带的北美大气数据库,则会产生一定的偏差,这种偏差一般在±6℃以内,但只要将大气环境数据库换成澳大利亚本地的数据库,则生成的红外图像逼真度较高,偏差可在±3℃以内。

结合本文的工作,可以认为,图像的逼真性同样也会受到大气数据库的影响。一旦能够获得目标地区实际的大气数据库,则红外图像的精度可进一步提高。

作为工程应用来说,本文的方法可以提供可工程化使用的红外图像动态实时生成方法并可形成相对容易操作使用的软件系统,可解决地物背景红外图像的实时生成问题,因而具有很强的实际应用价值。

4 结束语

为构建战场环境红外仿真系统并最终实现红外成像制导系统的效能评估,本文提出了一种基于 Terra Vista 和 Vega 软件的地物背景战场环境红外图像生成方法,该方法工程实用性强,易于实现,可满足复杂战场环境红外图像生成中地物背景仿真的需要。

但是,由于 SensorVision 模块本身所带大气数据库的原因,其红外图像渲染的真实性有待进一步提高。对于目标的红外成像建模,利用 OpenGL^[10]、OSG^[11]、OGRE^[12]等渲染引擎来生成红外图像或许可以实现更为精确的红外辐射亮度计算。但对于具有复杂地物背景的红外图像渲染而言,类似于 Vega 的商业软件在实用性和通用性上无疑具有一定的优

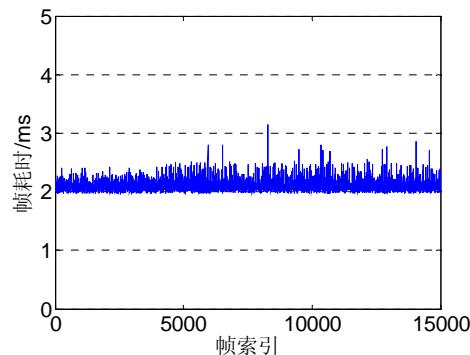


图10 帧耗时测试结果

Fig.10 Results of the frame time test

势^[13]。因此,对于地物背景战场环境红外图像的生成,可采用 Vega 与 OpenGL 相结合的方法,即地形模型用 Vega 进行渲染,目标模型通过 Vega 回调函数利用 OpenGL 进行渲染。这样,既保证了目标模型渲染的真实性,又实现了对地物背景红外图像生成建模的快速性,是一种高效、易于工程化实现的战场环境红外图像实时生成方案。

参考文献:

- [1] 李卓,李平. 动态红外图像生成技术综述[J]. 红外与激光工程, 2006, 35(增刊): 283-294.
- [2] 马斌,程正喜,翟厚明,等. 国产电阻阵列技术的发展趋势[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(12): 2314-2327.
- [3] 王超范. 一种地面场景动态红外仿真方法研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2009.
- [4] 廖守亿,苏德伦,张金生,等. 红外成像目标模拟器图像生成系统的实时性措施[J]. 红外与激光工程, 2010, 39(3): 377-382.
- [5] 杨春伟,廖守亿,苏德伦,等. 电阻阵列非均匀性测试与校正[J]. 红外技术, 2013, 35(6): 345-349.
- [6] 苏德伦,廖守亿,张金生,等. 电阻阵列非均匀性校正算法实时性研究[J]. 红外技术, 2009, 31(11): 634-638.
- [7] 张尚弘,张超,郑钧,等. 基于 Terra Vista 的流域地形三维建模方法[J]. 水力发电学报, 2006, 25(3): 36-39.
- [8] 王宇庆,王索建. 红外与可见光融合图像的质量评价[J]. 中国光学, 2014, 7(3): 396-401.
- [9] Ninh T Duong, Michael Wegener. SensorVision validation: diurnal temperature variations in northern Australia[C]//Proc. of SPIE, Orlando, Florida, USA: 2000, 4027: 329-340.
- [10] 娄树理,董言治,周晓东. 基于 OpenGL 的舰船目标红外图像生成[J]. 弹箭与制导学报, 2007, 27(5): 71-74.
- [11] 黄建峰,范小礼,王俊. 基于 OSG 的红外动态场景仿真[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(增刊 1): 18-23.
- [12] 王波. 基于 OGRE 的红外成像实时仿真方法研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2010.
- [13] Jean Latger, Thierry Cathala, Nicolas Douchin, et al. Simulation of active and passive infrared images using the SE-WORKBENCH[C]// Proc. of SPIE, Orlando, Florida, USA: 2007, 6543: 1-15.