

## 基于 Unity3D 的改进实时红外仿真系统

张 繁<sup>1)</sup>, 王 通<sup>2)</sup>, 黄可蒙<sup>1)</sup>, 茅佳明<sup>1)</sup>, 黎美玲<sup>1)</sup>, 王章野<sup>3)\*</sup>

<sup>1)</sup> (浙江工业大学计算机科学与技术学院 杭州 310023)

<sup>2)</sup> (北京空间飞行器总体设计部 北京 100094)

<sup>3)</sup> (浙江大学紫金港校区 CAD&CG 国家重点实验室 杭州 310058)

(zywang@cad.zju.edu.cn)

**摘 要:** 基于红外物理基础理论和自然场景仿真实验理论, 通过改进已有算法以满足红外仿真系统中的实时性和准确性 2 个基本要求, 提出基于 Unity3D 的改进实时红外仿真系统. 首先探讨并修正了部分零视距离辐射计算模型和影响温度场的主要计算模型, 在计算中考虑太阳赤纬角, 改进经验公式, 提高了计算的准确性; 然后在讨论了热源放置和热传递计算问题之后, 在红外仿真中考虑物体不同材质特性对红外效果的影响, 使得绘制结果更为逼真; 最后借助 GPU 对不同场景对象多角度下的红外辐射灰度进行并行计算, 提升计算速度. 该系统基于 Unity3D 游戏引擎, 可以构建包含多种目标对象的红外场景, 如植被、建筑以及车辆; 重建的三维场景仿真效果图与实地拍摄的真实红外场景图像高度相似. 仿真实验渲染速度达到 30 帧/s, 基本满足实时性计算要求.

**关键词:** 红外仿真; 计算模型; 并行加速; 红外辐射

**中图法分类号:** TP391.41 **DOI:** 10.3724/SPJ.1089.2018.16737

## One Improved Real-Time Infrared Simulation System Based on Unity3D

Zhang Fan<sup>1)</sup>, Wang Tong<sup>2)</sup>, Huang Kemeng<sup>1)</sup>, Mao Jiaming<sup>1)</sup>, Li Meiling<sup>1)</sup>, and Wang Zhangye<sup>3)\*</sup>

<sup>1)</sup> (College of Computer Science and Technology, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023)

<sup>2)</sup> (Beijing Institute of Spacecraft System Engineering, Beijing 100094)

<sup>3)</sup> (State Key Laboratory of CAD&CG Zhejiang University, Hangzhou 310058)

**Abstract:** Based on infrared physics fundamentals and natural scene simulation theories, we proposed an improved system for infrared scene simulating to fulfill the real-time and accuracy requirements. Firstly, we discussed and improved zero-range-distance infrared radiation and temperature field calculation models. We reformed the empirical formulations by considering the declination of the Sun to improve the accuracy of our computation. Secondly, after we discussed the problems of positioning the heat resource and computing the heat transmission, we incorporated and took account of infrared features of different physical materials to generate high-quality rendering effects. Lastly, we used GPU to accelerate the computation for infrared emission gradation of multiple objects in various scenes. Our system is based on Unity3D and it can construct many infrared scenes consisting of multiple objects, for instance, plants, buildings and vehicles. The comparisons of our simulation results with the authentic infrared images show the effectiveness of our system. Additionally the rendering speed of 30 frames per second can meet most basic real-time computational requirements.

收稿日期: 2017-07-01; 修回日期: 2017-10-20. 基金项目: 国家自然科学基金(U1736109, 61303141, 61772456); 国家重点研发计划(2017YFB1002700); 国家“八六三”高技术研究发展计划(2015AA016404); 浙江省自然科学基金(LY12F02034, LY18F020034). 张 繁(1978—), 男, 博士, 副教授, 硕士生导师, CCF 会员, 主要研究方向为计算机图形学、并行计算; 王 通(1987—), 男, 博士, 工程师, 主要研究方向为计算机图形学、飞行器设计与仿真; 黄可蒙(1993—), 男, 在校学生; 茅佳明(1995—), 男, 在校学生; 黎美玲(1990—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为计算机仿真、机器学习; 王章野(1965—), 男, 博士, 副教授, 博士生导师, CCF 会员, 论文通讯作者, 主要研究方向为计算机仿真、真实感图形学.

**Key words:** infrared simulation; computation model; parallel acceleration; infrared radiation

当物体温度大于绝对零度的时,物体就会对外产生红外辐射,即向外发射红外电磁波,红外电磁波的波长范围介于可见光波和微波之间,波长范围大约是  $0.76\sim 1\,000\,\mu\text{m}$ . 在夜间等光线较弱或者目标伪装隐蔽的条件下,由于目标对象自身辐射红外波,而且辐射的强度与温度成正相关,因此利用红外波进行热成像可以提供许多可见光无法提供的信息,红外技术在军事侦察、机械故障诊断等领域具有重要作用.

红外仿真是对实际红外成像设备的成像图片进行模拟仿真,通过物理模型对物体表面温度场进行计算,求解出物体表面的零视距离红外辐射值;在此基础上,考虑多种外界条件对红外辐射值的影响,如大气条件和设备干扰,进一步计算出输入到接收设备的辐射值,并将该辐射值转化为灰度值作为仿真图像的颜色值,从而得到仿真图像. 在利用实际的红外成像设备进行实地拍摄实验时,常常受到多方面的因素制约,如不可控的环境因素、人力资源以及经济成本. 一个较为准确的红外仿真系统可以仿真出多种环境条件下的任意时段的红外场景图像,因而,借助红外仿真系统,可以大大节约人力资源以及经济成本,并且操作灵活度较高. 虽然红外仿真技术在军用和民用上用途广泛,但是其计算复杂度较高,仿真结果的准确性难以衡量等问题急需解决.

因为地球大气对红外波段的不同子波段的透过率不同,所以通常将红外波段分为短波红外、中波红外和长波红外 3 个区域. 红外物理成像模型包括温度场分布计算模型、大气传输计算模型以及成像过程仿真模型 3 个方面.

温度场分布计算模型分为经验模型和物理模型. 经验模型在很大程度上忽略了红外物理的过程机制,通过对大量的统计数据归纳拟合出较为实用的物理模型,通过经验公式预测温度场的分布,在准确性上存在很大的欠缺;但在实际的仿真运行效率上却有很好的表现,因此在对仿真精度要求不是很高的情况下,可以采用经验模型. 物理模型则是通过对辐射产生过程的分析建立热平衡方程,进而对其进行求解,从而计算出物体表面温度场的分布,由此结合普朗克定律产生红外图像;图像的仿真精度相对较高、成像效果相对较好.

近年来,随着计算硬件条件的不断提升,很多

工作开始探究如何高效和快速地建立红外仿真模型. Sheffer 等<sup>[1]</sup>和 Biesel 等<sup>[2]</sup>根据物体材质和外界环境条件建立热平衡方程,进而获得物体表面温度场分布的计算模型. Owens 等<sup>[3]</sup>通过求解面元温度与外部环境因素关系的线性方程,得到物体表面温度场分布的模型; Liao 等<sup>[4]</sup>基于物体表面的红外材质属性和热传递规律提出简化的热量传递平衡方程,通过有限差分法动态迭代计算热平衡方程,得到往后时刻的物体表面温度,从而计算出物体表面的温度场分布. 杨尧等<sup>[5]</sup>从海面热平衡方程出发,将平衡方程的各项用温度函数表示,然后从平衡方程中求解出海面的温度场分布. 刘世光<sup>[6]</sup>基于红外辐射原理,提出一种红外云天背景实时生成的方法. Wang 等<sup>[7]</sup>提出一种基于模型红外材质进行温度场求解的有效计算方法. 廖惟博等<sup>[8]</sup>提出一种结合光滑粒子流体动力学(smoothed particle hydrodynamics, SPH)模型及海水热传导机制的模型,成功地绘制出海面船只的红外尾迹场景特征图像.

在大气传输计算模型研究上国外起步较早,并且已经成功地研发出了一系列具有较高使用价值的大气计算模型和软件,而最具代表性的是美国空军基地研制出的大气传输模型 LOWTRAN<sup>[9]</sup>和 MODTRAN<sup>[10]</sup>. LOWTRAN 适用于 30 km 以下的大气环境,MODTRAN 适用于 60 km 以下的大气;当大气高度超过 60 km 以后,则需要更为精准的 FASCODE 模型<sup>[11]</sup>. FASCODE 模型是完全逐线的 Beer-Lambert 算法,是最精细的光谱分辨率“精确”计算孤立重叠的分子谱线,因而其精度相对较高;但是,由于该模型需要花费大量时间求解积分,故此在红外仿真中常常使用耗时较少的 MODTRAN 模型. Li 等<sup>[12]</sup>在求解物体表面零视距离辐射到达相机的辐射值时,即利用 MODTRAN 作为系统的辅助模块,计算物体到达相机的辐射透过率. 周国辉等<sup>[13]</sup>从分析红外辐射在大气中传播的影响因素出发,分别给出大气吸收、大气散射和气象衰减系数,并计算出倾斜海平面水平等效路程,最后给出一种计算红外大气透过率的数学模型;该模型的精确性比较 FASCODE 模型存在较大不足,但在对精度要求不是很高的工程领域实现简单,运行效率较高,基本上可以满足要求,具有较好的使用价值.

对于成像过程仿真模型, Li 等<sup>[12]</sup>假设到达成像设备的辐射满足普朗克定律, 提出了考虑图像模糊效果、噪声效果和光晕效果的仿真模型. 高伟等<sup>[14]</sup>通过对设备多种噪声因素的分析, 提出白噪声贴图混合仿真模型, 并从像素层面提出了卷积和图像模糊仿真模型.

目前, 国内还没有成型的具有较高实用性的红外仿真系统, 而国外已有许多成熟的系统, 如美国 Presagis 公司的 Vega Prime 仿真系统. 本文针对红外仿真系统的实时性和准确性要求, 首先讨论了零视距离辐射计算模型, 并对影响温度场的主要计算模型进行了修正; 然后在讨论了热源设置和场景渲染问题的基础上, 结合计算机图形学中的视景仿真技术, 给出了系统的核心模块设计和实验结果.

## 1 零视距离辐射计算模型

物体表面的零视距离辐射主要包括自身辐射和反射辐射 2 个方面. 本节分别阐述这 2 个方面所涉及的物理计算模型以及热平衡方程的求解.

### 1.1 自身辐射

物体表面的辐射主要以自辐射为主, 普朗克定律揭示了辐射能量与电磁波长以及温度之间的关系. 由此, 通过在给定温度下对普朗克公式关于给定的波段区间进行积分, 即可得到某波段的辐射强度

$$[E_b]_{\lambda_1}^{\lambda_2} = \varepsilon \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{C_1 \lambda^{-5}}{e^{\frac{C_2}{\lambda T}} - 1} d\lambda;$$

其中,  $[E_b]_{\lambda_1}^{\lambda_2}$  表示波段为  $\lambda_1$  到  $\lambda_2$  的电磁波辐射力.

由于积分的计算比较消耗时间, 因此本文采用王章野<sup>[15]</sup>提出的近似公式

$$[E_b]_{\lambda_1}^{\lambda_2} = \left[ \varepsilon \frac{C_1}{C_2} e^{-\frac{C_2}{T}} \left( \lambda^3 + \frac{3}{C_2} \left( \lambda^2 + \frac{2}{C_2} \left( \lambda + \frac{1}{C_2} \right) \right) \right) \right]_{\lambda=\frac{1}{\lambda_1}}^{\lambda=\frac{1}{\lambda_2}},$$

即可通过物体表面的温度求解其表面的辐射力. 所以在求解自身辐射时, 关键是准确地求解模型的表面温度. 影响物体表面温度主要有辐射换热、对流换热和导热换热 3 个方面.

### 1.1.1 辐射换热

辐射换热即高温物体通过辐射作用, 将能量传递给相对低温物体. 在自然界中, 主要的辐射是太阳对地球的辐射, 分为太阳直接辐射和大气造成的太阳散射辐射, 由于日地距离较远, 因此通常将太阳垂直辐射大气表面的辐射力视为定值, 称为太阳辐射常数, 用  $I_0$  表示, 其数值为  $1\,353\text{ W/m}^2$ , 地表平面所接收的太阳直接辐射力

$$I_d = \left( 1 + 0.034 \left( \cos \frac{2\pi n}{365.2422} \right) \right) I_0 P^{\frac{1}{\sin h}}.$$

其中,  $h = \arcsin(\sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos \tau)$  表示太阳高度角;  $\varphi$  表示地理纬度;  $\delta$  表示赤纬角;  $\tau$  表示时角,  $\tau = 15 \left( t_0 + \frac{\phi - \phi_0}{15} - 12 \right)$ ;  $\phi$  表示地理经度;  $t_0$  表示北京时间;  $n$  表示日期在一年天数中的序号;  $P$  表示大气透过率.

在多数的文献资料中, 计算赤纬角时均采用近似公式, 如石川凌等<sup>[16]</sup>采用

$$\delta = 23.45 \sin \left( 360 \frac{284 + n}{360} \right).$$

由于该公式简单地利用三角函数的周期性近似太阳直射点在南北回归线偏移的周期性, 误差较大. 通过几何分析, 本文给出更为准确的理论计算模型及其推导过程.

根据相对运动的规律, 地球绕太阳的圆周运动可以视为以地球为圆心、太阳绕地球的圆周运动. 赤道面和太阳运动轨迹的交点分别为春秋分点, 轨迹示意图如图 1a 所示, 太阳绕地球的轨迹圆为  $\widehat{AS}$  所在的圆, 太阳绕地球的公转周期与地球绕太阳的公转周期相同, 假设太阳绕地球作匀速圆周运动, 单位时间经过的圆周角为  $\theta$ , 以  $A$  为参考点, 太阳单位时间后运动到点  $S$ .

图 1b 是图 1a 在平面 DOF 上的剖面图, 其中,  $\theta_{tr}$  为黄赤交角, 其大小为  $23^\circ 26'$ ,  $OA$  长为  $R$ . 图 1a 中,  $SD \perp OA$ , 根据几何知识可知  $OD = R \cos \theta$ . 图 1b 中, 四边形  $DNH_2H_1$  为矩形, 可知太阳直射点的纬度高度为  $NH_2$ , 则  $\delta$  是赤纬角, 由此可以得出  $OD = \frac{DH_1}{\sin \theta_{tr}} = \frac{R \sin \delta}{\sin \theta_{tr}} = R \cos \theta$ . 进而可得  $\sin \delta = \cos \theta \cdot \sin \theta_{tr}$ .

假设累计日数零点是 2017 年 1 月 1 日, 2017 年

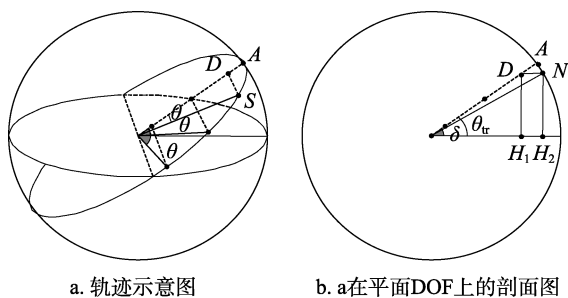


图 1 太阳运动轨迹示意图

春分日是 3 月 20 日, 该日的累计日数是 78 天. 由图 1 可知, 春分时  $\delta = 0^\circ$ , 由此可推算出赤纬角

$$\delta = \arcsin \left( \sin \theta_r \sin \left[ \frac{360}{365.2422} (N - 79) \right] \right).$$

地球表面受到太阳的散射辐射力

$$I_{sc} = \frac{1}{2} I_0 \sin h \frac{1 - P^{\sin h}}{1 - 1.4 \ln P}.$$

同时, 由于气球大气层的存在, 自然环境中还存在大气辐射, 正是因为大气辐射的存在, 使得大气环境相对比较稳定, 昼夜温差相对较小. 大气辐射的计算公式为

$$I_s = C_b \left( \frac{T_e}{100} \right)^4 (0.51 + 0.208 \sqrt{0.461 T_e f}).$$

其中,  $T_e$  表示外界环境温度,  $f$  表示空气绝对湿度.

对于场景中高温物体向相对低温物体辐射的净辐射力, 在不考虑反射的情况下, 计算公式为

$$E_{b1-2} = \left[ \varepsilon_1 C_b \left( \frac{T_1}{100} \right)^4 - \varepsilon_2 C_b \left( \frac{T_2}{100} \right)^4 \right] \psi.$$

其中,  $\psi$  表示角系数,  $\psi = 1$  表示表面平行,  $\psi = 0$  表示表面垂直.

### 1.1.2 对流换热

对流换热分为自然对流和受迫对流. 前者是因为温度不同导致密度差异, 从而产生压力差; 后者则是外力作用产生的对流, 如风的作用. 物体表面的热交换公式为  $q_{cv} = a(T_p - T_a)$ . 其中,  $T_p$  表示物体表面温度;  $T_a$  表示气温恒定区空气温度;  $a$  表示对流换热系数;  $q_{cv}$  表示单位面积热交换功率.

热交换系数受多种因素的影响, 其计算公式是由数理统计的方法推导出来的. 自然对流和受迫对流的计算公式各不相同, 情况各异. 分为如下情况:

#### (1) 自然对流垂直表面热交换系数

$$a = 1.98 \times \sqrt[4]{T_p - T_a};$$

#### (2) 自然对流水平表面, 当热流由下而上时的热交换系数

$$a = 2.5 \times \sqrt[4]{T_p - T_a};$$

#### (3) 自然对流水平表面, 当热流由上而下时的热交换系数

$$a = 1.31 \times \sqrt[4]{T_p - T_a};$$

#### (4) 受迫对流内表面热交换系数

$$a = 2.5 + 4.2 \times V;$$

#### (5) 受迫对流外表面热交换系数

$$a = (2.5 \sim 6) + 4.2 \times V.$$

其中,  $V$  表示风速. 自然环境中, 风级和风速的对应关系表见文献[17].

### 1.1.3 导热换热

某一时间间隔内, 同一区域的物体表面温度差异较小, 可近似认为相等. 所以对于物体表面, 可以将其视为是一维稳态导热, 即只有物体表面与物体内部存在温差, 热流从物体表面流入物体内部, 该一维稳态导热的计算公式为

$$q = \epsilon \frac{T_p - T_i}{d}.$$

其中,  $T_p$  表示物体表面温度;  $T_i$  表示物体内部温度;  $\epsilon$  表示导热系数;  $d$  表示物体材质厚度;  $q$  表示单位面积热交换功率.

### 1.2 反射辐射

当周围环境的辐射到达物体表面时, 一部分辐射被吸收, 另一部分被物体表面反射, 而这反射的部分辐射同样对物体辐射成像造成影响. 自然环境中, 物体表面反射的辐射主要源自大气辐射和太阳辐射, 由反射率和吸收率的概述可知, 反射辐射  $I_r = (1 - \epsilon)(I_d + I_{sc} + I_s)$ .

### 1.3 热平衡方程

自然环境中, 物体通过辐射作用从外界吸收热量, 同时也向外界释放热量, 通过对流换热向空气中释放或吸收热量, 并通过导热换热与物体自身其他部分或者直接接触的外界物体释放或吸收热量.

#### 1.3.1 平衡方程的推导

当物体表面释放的热量和吸收的热量相等时, 物体表面达到热平衡, 温度不再上升或者下降. 由此可得出物体表面的热平衡方程

$$\Delta q = \epsilon(I_d + I_{sc} + I_s) - q_{cd} - q_{cv} - q_{air}.$$

其中,  $q_{air}$  表示物体辐射到空气中的辐射力;  $\Delta q$  表示物体表面接收的净辐射力.

#### 1.3.2 平衡方程的求解

物体通常是具有一定厚度的实体, 求解表面温度场分布的过程中, 其自身的厚度对其表面

具有直接影响作用. 本文在求解表面温度场时将物体视为多层分布的实体, 在各层间视为一维方向上的传热过程. 由傅里叶定律可知, 在一维方向上导入的热量为

$$\phi_1 = -\kappa \frac{\partial T(t, x)}{\partial x} A;$$

导出的热量为

$$\phi_2 = -\kappa \frac{\partial}{\partial x} \left( T(t, x) + \frac{\partial T(t, x)}{\partial x} \Delta x \right) A;$$

热量的增量为

$$\Delta \phi = C\rho \frac{\partial T(t, x)}{\partial t} \Delta x A = \phi_2 - \phi_1.$$

其中,  $C$  表示物体材质比热容, 单位是  $J/(kg \cdot K)$ ;

$\rho$  表示物体材质密度, 单位是  $kg/m^3$ .

由此可得一维方向传热的微分方程式

$$\frac{\partial T(t, x)}{\partial t} = \frac{\kappa}{C\rho} \frac{\partial^2 T(t, x)}{\partial x^2} \quad (1)$$

通过有限差分法, 式(1)又可转变为利于计算机求解的离散形式

$$\frac{T(t + \Delta t, x) - T(t, x)}{\Delta t} = \frac{\kappa}{C\rho} \frac{(T(t, x + \Delta x) + T(t, x - \Delta x) - 2T(t, x))}{\Delta x^2}.$$

通过对一维传热微分方程的离散公式进行迭代计算, 可以求出物体表面以及内部的温度分布.

## 2 红外热源仿真

本节介绍热源设置和热传递核心算法.

### 2.1 热源设置

本文采用立体相机作为热源, 即 6 个视方向互相垂直的相机组成的全景视角相机, 如图 2 所示.

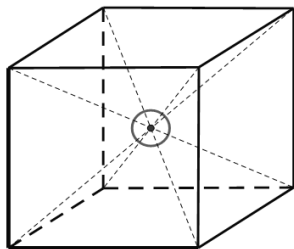


图 2 立方体相机热源示意图

### 2.2 热传递核心算法

将该立体相机放入模型内部的适当位置, 并将 6 个相机视野中的图像渲染到一幅纹理图像上; 根据视野中表面材质的信息计算单位距离处内表面受到

的热源辐射, 进而通过相机中的深度信息计算出每一个纹素受到的辐射; 最后计算出该材质在热源影响下的灰度增量, 并保存到纹理中, 利用 Unity3D 中的 ComputerShader 对纹理进行二次计算, 计算出受到热源辐射区域对周边纹素的传热灰度. 该方法利用 GPU 的并行计算能力, 计算速度较快, ComputerShader 中计算热传递算法的伪代码如下:

输入. 原始热源纹理值 *basicTexture*.

输出. 最终热源纹理值 *heatTexture*.

Step1. 对于任意像素点  $i$ .

Step2. 读取该像素点左侧像素点的灰度值  $a$ .

Step3. 读取该像素点右侧像素点的灰度值  $b$ .

Step4. 读取该像素点上侧像素点的灰度值  $c$ .

Step5. 读取该像素点下侧像素点的灰度值  $d$ .

Step6. 读取该像素点自身的灰度值  $k$ .

Step7. 计算该像素点周围像素点灰度的平均值  $n$ .

Step8. 将  $k$  和  $n$  代入  $f = (k + n) / 2$  计算出新的灰度值  $f$ .

Step9. 将计算出的灰度值  $f$  赋值给像素  $i$  的热源纹理值 *heatTexture<sub>i</sub>*.

以汽车为例, 得到的最终热源纹理如图 3 所示.



图 3 仿真热源贴图

在片段程序中读取纹理颜色值进行加和, 即得到热源的效果, 图 3 对应的热源仿真效果如图 4 所示.



图 4 热源仿真效果图

### 3 红外仿真核心模块

本文系统的核心模块是对红外灰度数据的求解、存储传输以及绘制, 算法流程如图 5 所示。

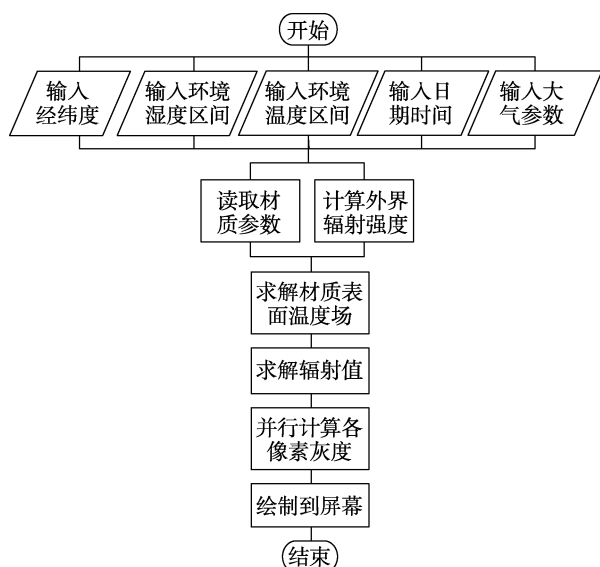


图 5 算法流程图

根据时间的变化计算环境温度和湿度、材质的热辐射属性, 以及表面的温度场分布。通过对高度和角度的线性插值, 计算出物体表面辐射与相机之间的大气透过率, 以及各材质到达相机位置的理想辐射数据值。本文不考虑物体表面的倾斜度以及物体表面法相与相机视线方向的夹角, 原因是场景中不同物体的表面的朝向不一致, 相同物体不同表面法向存在差异。由于 CPU 计算性能的限制以及系统的实时性需要, 无法对场景中所有物体的表面倾斜角度都进行辐射计算, 因此在逻辑功能部分仅计算水平表面的辐射。通过灰度转化公式  $g = \frac{E - E_{\min}}{E_{\max} - E_{\min}}$  将辐射值转化为理想状态灰度。其中,  $g$  表示辐射灰度;  $E$  表示到达相机的辐射值;  $E_{\max}$  表示到达相机的最大辐射值;  $E_{\min}$  表示到达相机的最小辐射值。

将各材质的理想状态灰度值传入 GPU, 通过各材质的理想状态灰度, 利用 GPU 的并行能力计算每一个像素位置处模型表面的法相与视线方向的夹角, 以及模型表面与太阳之间的夹角; 计算出模型表面朝向对表面辐射的影响下的辐射灰度, 将此灰度作为每一个像素的颜色值输出, 并在系统每帧条件下更新计算所有像素颜色值, 保证系统计算的实时性。

### 4 系统实现

本文系统提供自然场景的仿真功能, 模拟不同时刻自然环境, 同时提供了用户的交互功能, 如图 6 所示。

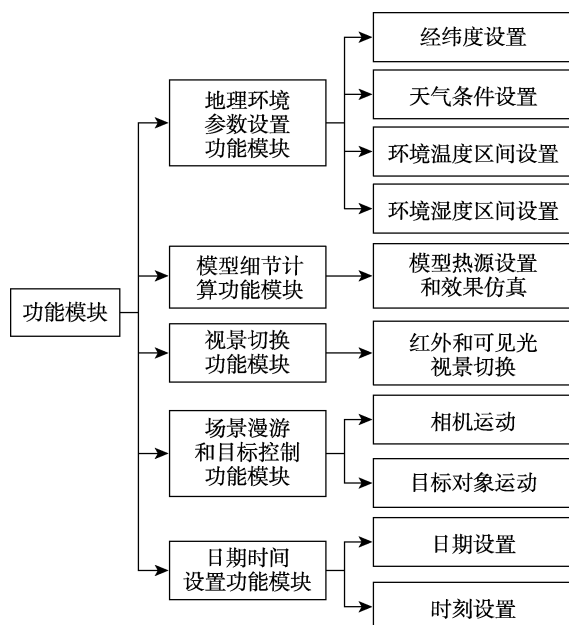


图 6 系统功能概述图

图 6 中, 地理环境参数设置功能模块提供了经纬度设置, 环境参数设置包括日最低/最高气温、云层类型设置、天气条件设置等, 用户可以通过该功能模块仿真多种地理位置和天气条件下的红外场景; 视景切换功能模块提供用户在自然视景和红外视景的切换功能, 增加系统的实用性。场景漫游以及目标控制功能模块提供用户在场景中的漫游, 并可控制场景中的模型对象运动, 如船体的航行。日期时间设置功能模块包括日期设置和时刻设置, 用户可以通过该功能模块设定系统仿真任意日期及任意时刻的红外场景。

利用数学模型, 可以求解出多种环境条件下的环境参数值, 如环境湿度、环境温度、太阳高度、大气辐射以及太阳辐射等, 进而通过迭代计算求解出材质表面的温度场。由于这部分涉及的计算量较大, 在实现过程中采用运行效率较高的 C++ 语言进行编写, 并编译成动态链接库。通过提供调用接口, 再在 Unity3D 的脚本中调用, 从而实现求解多种材质的理想温度场。材质表面热平衡方程的具体求解的算法流程如图 7 所示。

实验系统硬件配置如下: Intel i5-4460 CPU, NVIDIA GeForce GTX 750 GPU, 16 GB 内存。

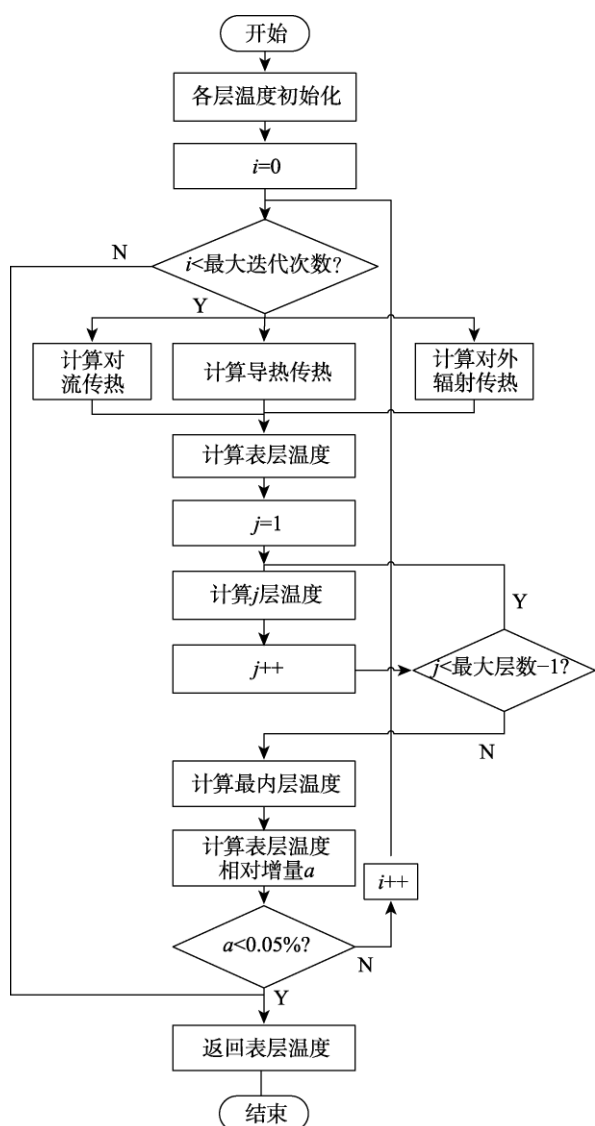


图7 热平衡方程求解算法流程图

在求解热平衡方程时, 考虑到系统的效率和实时性, 对求解过程设置了迭代次数的上限以及

求解结果的容许误差, 当迭代次数达到上限或者求解结果在误差允许范围内时, 则停止迭代, 从而提高了系统的渲染帧率. 在真实的求解过程中, 迭代 100 次后温度计算结果为 24.9 K, 而最终的平衡温度为 25 K, 从 24.9 K 至 25 K 虽然只增加 0.1 K, 但是迭代次数需要增加 300 次以上, 因而在很大程度上降低了系统的性能. 为了避免这种情况的出现, 在求解过程中设置了容差值以及迭代上限次数. 通过文献[16]提供的不同材质热辐射红外参数属性表, 可以求解出不同材质表面在不同环境条件下的理想温度场分布, 进而计算出理想状态红外灰度值. 通过 Unity3D 提供的 CPU 与 GPU 数据交互逻辑, 将计算得到的灰度数据保存在 Shader 的包含文件中, 不同材质的 Shader 通过包含该文件, 通过变量名获取相应的材质理想红外灰度值. 具体的实现流程如图 8 所示.

通过环境参数的采集, 在 Unity3D 中编辑场景. 每帧计算完成后, 利用 GPU 的纹理绘制操作将结果传递至用于绘制的着色器纹理中, 可进一步得到经并行加速计算后的物体表面零视距辐射, 得到的仿真场景效果图如图 9 所示. 不过由于 Unity3D 绘制策略, 最高帧率会被限制在 30 帧/s 左右.

从图 9 可以看出, 仿真图像同时展现了多种对象的红外效果, 并表现出相同模型对象不同表面之间的辐射差异; 如车的顶部与车门的差异. 二者均属于同一种物理材质, 但是相对空间位置不同, 朝向也不同, 因此到达相机的辐射灰度也就不同; 被阳光照射到的草坪的灰度较高, 背影处的草坪灰度较小, 并且被阳面的树木灰度也很低; 同时, 图像中表现出红外图像的模糊以及噪声效果.

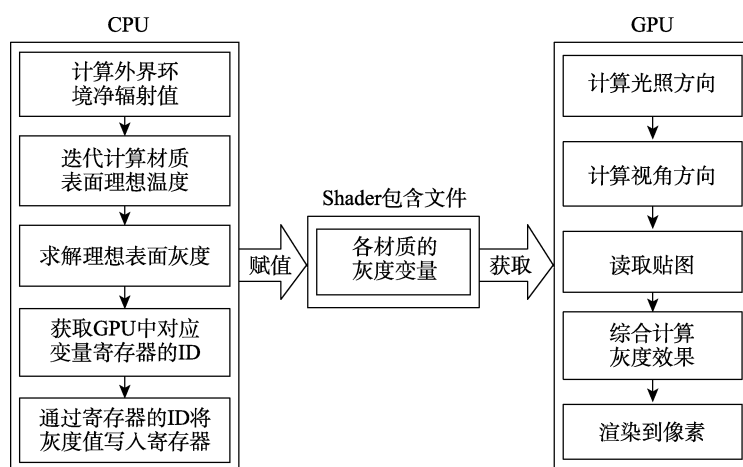


图8 系统流程图





图 9 轿车正午红外场景仿真侧视图

通过日期功能模块调整场景中的时间, 得到新的仿真图像如图 10 所示.



图 10 轿车午夜红外场景仿真侧视图

从图 10 可以看出, 与图 9 白天的仿真图像相比, 夜晚的仿真图像差异比较明显: 并且车表面的灰度差异尤其明显: 顶部的灰度较低, 而车门处的灰度相对较高, 夜晚树木树干和枝叶比较接近灰度较高, 和白天差异明显. 这是因为夜晚不受太阳辐射的影响, 材质表面的温度比较均匀.

通过操作相机在场景中漫游可以得到场景对象各个角度和距离处的仿真图像, 如图 11 所示. 可以看出, 在不同视角下玻璃表面的灰度差异十分明显, 这是因为玻璃对外界红外辐射的反射作用比较强, 而且表面平整, 因此玻璃辐射的方向比较统一, 类似镜面反射, 在反射方向上看到的灰度较高, 偏离该方向的灰度较低.



图 11 轿车午夜红外场景仿真正视图

为了验证系统仿真的真实性, 利用红外热像仪连续拍摄真实场景的红外图像, 并记录下拍摄

时间; 同时利用系统仿真相应时间的红外图像, 分别对一天中多个时间段的图片进行对比, 如图 12 所示.

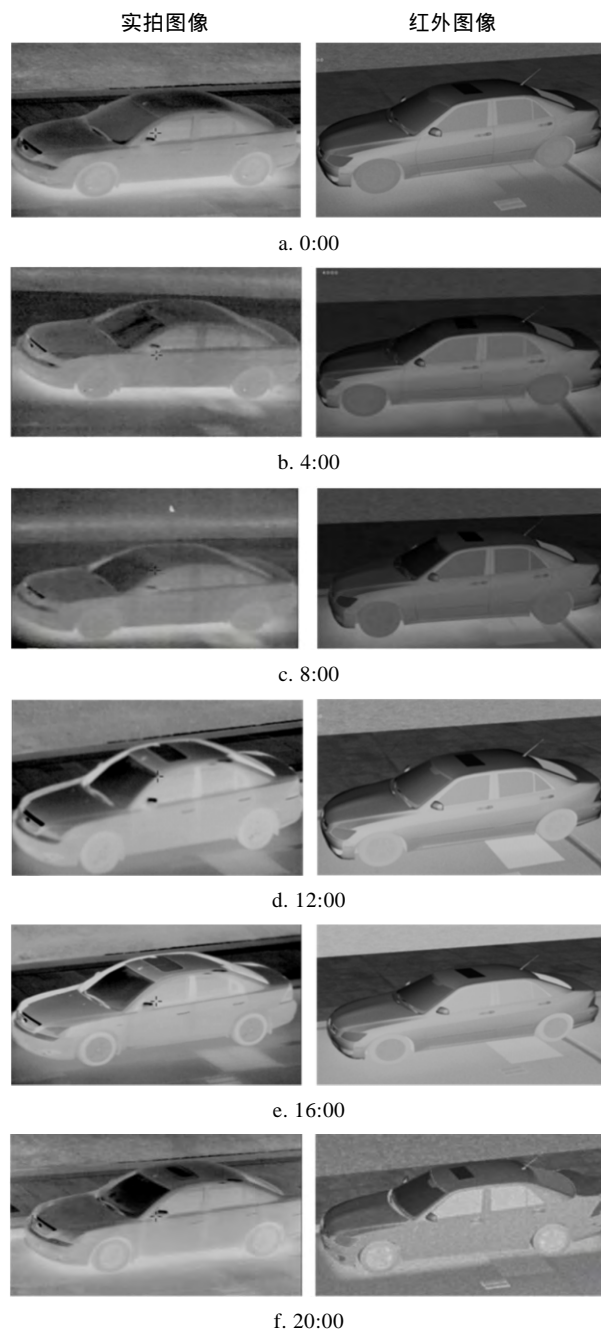


图 12 实拍和仿真红外图像效果对比

从人眼的视觉角度来看, 系统的仿真图像与真实场景的红外图像基本一致. 为了进一步考察系统仿真的真实性, 通过一天(24 h)统计真实环境中若干基本对象的温度数据, 如水泥地、车门、草地. 在相同环境温度区间, 系统对这 3 个目标对象表面温度场的求解. 以上 2 类温度变化对比如图 13 所示.



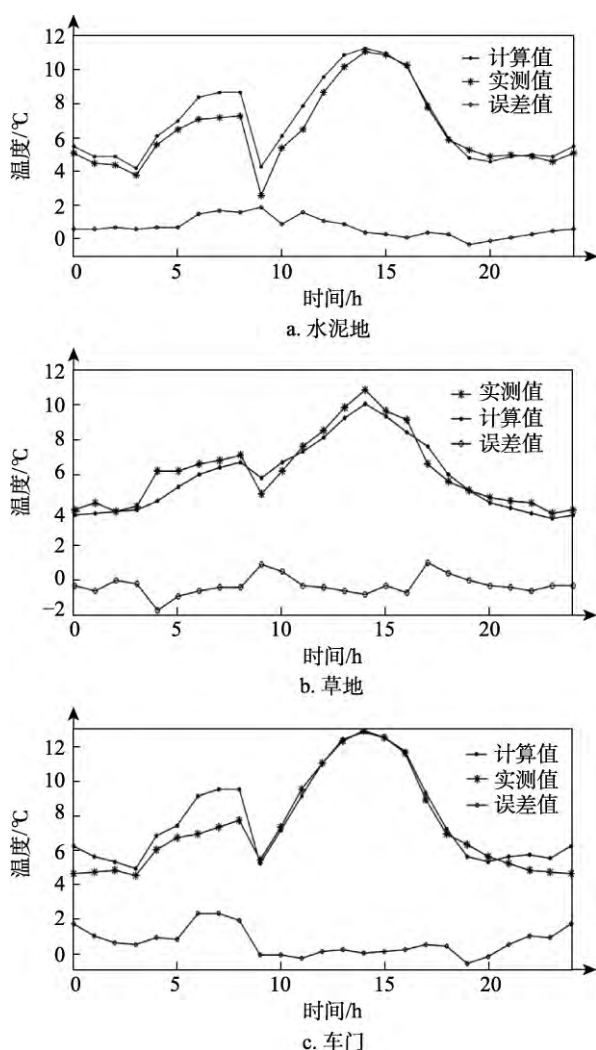


图 13 24 h 温度变化仿真实测对比图

从图 13 可以看出, 在具体的材质温度上, 仿真数据和真实数据存在微小误差。这是因为在真实的自然环境中影响温度的因素较多, 而系统仿真过程仅考虑主要的影响因素; 而且温度的测量仪器本身存在误差, 容易受到周围环境影响。总体上来说, 系统仿真实验结果较为准确, 可信度较高。

## 5 结 论

本文的贡献主要包括 3 个方面:

1) 对于自然红外场景仿真, 太阳高度等参数对计算结果的精确性影响较大。本文通过对影响温度场的主要计算模型进行修正, 改进了前人使用的经验模拟公式, 在保证一定系统渲染帧率的基础上应用了更加精确的理论推导公式, 如太阳赤纬角的计算公式。

2) 基于 Unity3D 提出新的红外仿真算法, 使

得任意物体对象能够在系统中反映自身的特性, 包括内在物理特性或外在关系等因素, 如内在物理材质参数和外在相对位置关系等。

3) 根据场景模型表面材质属性和内部热源属性, 利用 GPU 并行加速能力快速求解受热源影响的表面温度场分布, 合理分配 CPU, GPU 的计算量, 充分利用计算资源, 提高了系统的运行效率。

随着虚拟现实和增强现实技术的发展, 人们对自然场景仿真提出了更高的要求。下一步, 将结合头盔、双目眼镜等硬件设备, 将红外仿真系统拓展到虚实结合环境中, 进一步提升用户的体验。

## 参考文献(References):

- [1] Sheffer A D, Cathcart J M. Computer generated IR imagery: a first principles modeling approach[C] //Proceedings of SPIE. Bellingham: Society of photo-Optical Instrumentation Engineers, 1988, 0933: 199-206
- [2] Biesel H, Rohlfing T. Real-time simulated forward looking infrared (FLIR) imagery for training[C] //Proceedings of SPIE. Bellingham: Society of photo-Optical Instrumentation Engineers, 1986, 0781: 71-80
- [3] Owens W R. Data-based methodology for infrared signature projection[C] //Proceedings of SPIE. Bellingham: Society of photo-Optical Instrumentation Engineers, 1986, 0636: 96-99
- [4] Liao B B, Wang Z Y, Ke X D, *et al.* IR scene image generation from visual image based on thermal database[C] //Proceedings of SPIE. Bellingham: Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers Press, 2007, 6787: 1-8
- [5] Yang Yao, Wu Zhensen, Yao Lianxing. Solving the sea surface temperature from the infrared radiation heat balance equation [J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2003, 22(5): 357-360(in Chinese)  
(杨 尧, 吴振森, 姚连兴. 从红外辐照热平衡方程求解海面温度[J]. 红外与毫米波学报, 2003, 22(5): 357-360)
- [6] Liu Shiguang. Studies on realistic modeling and rendering of atmospheric phenomena[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2007(in Chinese)  
(刘世光. 大气现象的真实感建模及绘制技术研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2007)
- [7] Wang H, Wang X, Liu L, *et al.* Natural scene temperature field calculation and infrared radiation simulation based on OptiX[J]. Optical Engineering, 2015, 54(7): Article No.073101
- [8] Liao Weibo, Zhao Xiaoyang, Zhang Fan, *et al.* Realistic rendering of infrared ship wake on the sea based on infrared physics and hydrodynamics[J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2017, 29(7): 1227-1234(in Chinese)  
(廖惟博, 赵霄洋, 张 繁, 等. 基于红外物理学和流体动力学的海面船只红外尾迹真实感绘制[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2017, 29(7): 1227-1234)
- [9] Kneizys F X, Shettle, E P, Abreu L W, *et al.* Users guide to LOWTRAN 7[D]. Santa Barbara: University of California Libraries, 1988

- [10] Berk A, Bernstein L S, Robertson D C. MODTRAN: a moderate resolution model for LOWTRAN[R]. Bedford: Hanscom Air Force Base, 1987
- [11] Clough S A, Kneizys F X, Shettle E P, *et al.* Atmospheric radiance and transmittance-FASCOD2[C] //Proceedings of Conference on Atmospheric Radiation. Boston: American Meteorological Society Press, 1986: 141-144
- [12] Li N, Lv Z, Wang S, *et al.* A real-time infrared radiation imaging simulation method of aircraft skin with aerodynamic heating effect[J]. Infrared Physics & Technology, 2015, 71: 533-541
- [13] Zhou Guohui, Liu Xiangwei, Xu Jiwei. A math model of calculate the atmospheric transmittance of infrared radiation[J]. Infrared Technology, 2008, 30(6): 331-334(in Chinese)  
(周国辉, 刘湘伟, 徐记伟. 一种计算红外辐射大气透过率的数学模型[J]. 红外技术, 2008, 30(6): 331-334)
- [14] Gao Wei. Image simulation in infrared guidance[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2008(in Chinese)  
(高 伟. 红外成像制导图像仿真[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2008)
- [15] Wang Zhangye. Research on infrared image synthesis and multi-spectral information fusion for objects on the ground[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2002(in Chinese)  
(王章野. 地面目标的红外成像仿真及多光谱成像真实感融合研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2002)
- [16] Shi Chuanling. Real-time simulation of infrared land and sea scene[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2016(in Chinese)  
(石川凌. 海陆场景的红外实时仿真研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2016)
- [17] Liu Nianxiong, Qin Youguo. Building thermal environment[M]. Beijing: Tsinghua University, 2016(in Chinese)  
(刘念雄, 秦佑国. 建筑热环境[M]. 北京: 清华大学出版社, 2016)