

基于物理模型的战场烟幕实时红外仿真

张作宇¹, 廖守亿¹, 张金城¹, 苏德伦^{1,2}, 闫循良¹

(1. 火箭军工程大学 控制工程系, 陕西 西安 710025; 2. 中国人民解放军 96111 部队, 陕西 韩城 715400)

摘要: 烟幕、灰尘、云、火焰等不规则物体的实时红外仿真技术是战场环境红外图像实时生成的关键技术和难点之一。以烟幕红外仿真为例, 首先基于 Navier-Stokes 方程对烟幕的外形进行了建模, 给出了其初始化和边界处理方法; 然后基于灰体辐射模型和光线投射算法考虑了烟幕自身辐射和太阳光照射两种因素对烟幕的红外辐射特性进行了建模; 最后, 利用 CUDA 并行计算工具对基于物理模型的烟幕红外仿真进行了实现, 成功地将红外烟幕嵌入到基于 Vega 的红外场景中, 并对利用 Vega 粒子系统产生的红外烟幕和基于物理模型的红外烟幕的效果进行了对比。仿真结果表明, 基于物理模型的烟幕红外仿真满足实时性需求, 且具有真实感强, 可控性好的优点。

关键词: 烟幕; 红外图像; 实时生成; Navier-Stokes 方程; CUDA; Vega

中图分类号: TP391.9 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.0404004

Real-time battlefield smoke IR simulation based on physical model

Zhang Zuoyu¹, Liao Shouyi¹, Zhang Jincheng¹, Su Delun^{1,2}, Yan Xunliang¹

(1. Department of Automation, The Rocket Force University of Engineering, Xi'an 710025, China;
2. 96111 Army of PLA, Hancheng 715400, China)

Abstract: The IR simulation technology of irregular objects, such as smoke, dust, cloud, flame and so on, is one of the key technologies and difficulties of real-time IR image generation. Take the IR simulation of smoke for example, first, the shape of the smoke was modeled based on the Navier-Stokes equation, the method of initialization and boundary processing was also provided. Then, the infrared model of the smoke which take into account the smoke's own radiation and the sun's radiation was built based on the gray body radiation model and the light projection algorithm. Last, the smoke IR simulation based on the physical model was implemented using the CUDA parallel computing tool, and the IR smoke was successfully embedded into the IR scene based on Vega, also, the effects of the IR smoke based on the physical model and the Vega particle system were contrasted. The results indicate that the smoke IR simulation based on the physical model can meet the requirements of real-time, and has the advantages of strong sense of reality and good controllability.

Key words: smoke; IR image; real-time generation; Navier-Stokes equation; CUDA; Vega

收稿日期: 2015-08-10; 修订日期: 2015-09-20

基金项目: 中国博士后科学基金(2013M532125, 2014T70974)

作者简介: 张作宇(1992-), 男, 硕士生, 主要从事导航、制导与控制方面的研究。Email: zhangzuoyu1002@163.com

导师简介: 廖守亿(1974-), 男, 副教授, 硕士生导师, 博士后, 主要从事飞行器系统建模与仿真, 导航、制导与控制方面的研究。

Email: lsy_nudt@sohu.com

0 引言

通过在实验室环境下模拟出逼真的、贴近实战的战场环境红外热图像从而构建红外成像制导半实物仿真系统,对于红外成像导引头的实战性能评估具有重要意义。而为了产生逼真的战场环境红外热图像,需要计算机实时生成战场环境红外图像,然后通过动态红外景象投射装置将计算机图像投射转换为具有真实辐射的红外热图像^[1]。这个过程涉及的关键技术很多,如如何生成逼真的计算机红外图像、如何准确地投射出红外热图像等。其中战场环境红外热图像实时生成是影响所投射红外热图像逼真度的关键环节之一,是实现基于半实物仿真的红外成像导引头实战性能评估的关键技术之一。在复杂战场环境中,烟幕、灰尘、云、火焰等不规则物体是场景中必不可少的组成要素,也是对红外成像导引头性能产生影响的主要干扰因素。由于这些不规则物体具有外形、状态、大小等随时间不断变化的特点,利用传统的三角形建模很难对其进行逼真模拟。因此,烟幕、灰尘、云、火焰等不规则物体的红外仿真技术对于生成逼真的战场环境红外图像至关重要。

当前,在红外图像实时生成技术领域,不规则物体的红外图像生成大多采用粒子系统对其进行建模^[2]。利用粒子系统来模拟不规则物体虽然能够产生较为逼真的外观,但是由于现实中不规则物体往往并不是由简单的粒子组成的,且其内部运动复杂,因此利用粒子系统往往难以对不规则物体进行真实描述。且若要产生逼真的外观,往往需要大量的粒子来对不规则物体进行模拟,这样计算开销大大增加,而当粒子个数较少时,则颗粒性明显,仿真效果差。近年来,在计算机图形学领域,基于物理模型和体绘制技术的不规则物体实时仿真技术得到了国内外学者的广泛关注。过去由于图形硬件计算能力较差,该技术一般只用作高质量计算机动画的离线渲染。而近年来由于图形硬件性能的大大提高和多种优化简化算法的提出,该技术已能够实现不规则物体的实时渲染且能够达到比粒子系统更为逼真的效果^[3]。

烟幕、灰尘、云、火焰等不规则物体具有许多相似的性质,其运动与变化的规律都符合流体的特性。因此,对烟幕、灰尘、云、火焰等不规则物体的建模方

法具有一定的通用性。文中以烟幕为仿真对象,采用经典的 Navier-Stokes 方程对烟幕的外形进行建模,考虑烟幕自身辐射和太阳光散射两种因素对烟幕的红外辐射特性进行建模,利用 CUDA 并行计算技术进行算法实现,并将所生成红外烟幕嵌入到 Vega 红外场景中,达到了烟幕实时红外仿真的目的,产生了比 Vega 粒子系统更加逼真的效果。

1 烟幕外形模型

如图 1 所示,整个烟幕的仿真被限定在一个长方体的空间中,该空间被分割为均匀的立方体网格。每一个网格都具有共同的属性,如烟幕浓度、温度、速度等。利用流体方程将各网格的不同属性进行对流,从而产生不断变化的烟幕外形。网格越密,仿真的精度越高,但计算量也会大大增加。

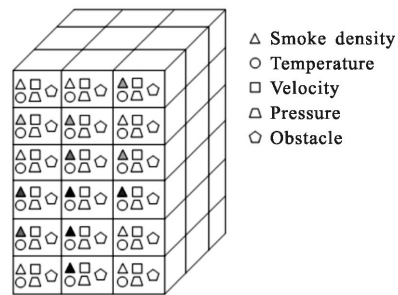


图 1 烟幕仿真空间结构示意图

Fig.1 Structure diagram of smoke simulation space

1.1 流体方程

用于描述低速不可压流体运动规律的 Navier-Stokes 方程描述如下:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = -(u \cdot \nabla)u - \frac{1}{\rho} \nabla \rho + v \nabla^2 u + f \quad (1)$$

$$\nabla \cdot u = 0 \quad (2)$$

式中: u 为速度矢量; p 为压强; ρ 为密度; v 为流体粘性系数; f 为外力产生的加速度。方程(1)右端第一项为对流项,第二项为压力项,第三项为扩散项,第四项为外力项。

Stam 提出了 Stable Fluids 方法,实现了对 Navier-Stokes 方程的大步长稳定求解,其主要求解过程如下。

首先,不考虑 Navier-Stokes 方程中的压力项,分别对速度场施加对流项、扩散项、外力项进行求解。其中求解对流项采用隐式 Semi-Lagrangian 方

法,数学描述如下:

$$u_1(x)=u_0(r(x,-\Delta t)) \quad (3)$$

式中: x 为当前位置; $r(x,-\Delta t)$ 为当前位置以当前速度回溯 Δt 时间所在的位置。即以回溯 Δt 时间所在位置的速度作为当前位置新的速度。

扩散项的求解采用隐式求解法,如下式所示:

$$(I-\nu\Delta t\nabla^2)u_2(x)=u_1(x) \quad (4)$$

式中: I 为单位矩阵。由于该方程为含有 Laplace 算子的 Poisson 方程,故一般采用迭代法求解,如 Jacobi 迭代。

外力项的求解较为简单,即:

$$u_3=u_2+\Delta t f(x,t) \quad (5)$$

然后,考虑压力项的最终速度场可利用以下两式进行求解:

$$\nabla^2 p=\nabla u_3 \quad (6)$$

$$u_4=u_3-\nabla p \quad (7)$$

公式(6)也是一个 Poisson 方程,求解方法类似扩散项的求解。 u_4 即为最终所求速度场。

由于 Stable Fluids 方法求解过程中存在严重的数值耗散,流体中的漩涡、卷曲等细节通常被数值耗散所掩盖。基于此,Fedkiw 提出了旋度限定(Vorticity Confinement)技术^[4]来恢复这些细节。首先,计算速度场的旋度,即:

$$\omega=\nabla\times u \quad (8)$$

然后,计算旋度场模的梯度并对其进行归一化。

$$\eta=\nabla|\omega|,N=\frac{\eta}{|\eta|} \quad (9)$$

最后计算出旋度限定力,以此来弥补由于数值耗散带来的细节丢失。

$$f_{vc}=\varepsilon h(N\times\omega) \quad (10)$$

式中: ε 为用户定义的控制旋度限定力强弱的系数; h 代表网格的大小。

旋度限定力以外力项的形式添加到 Navier-Stokes 方程中。

1.2 烟幕建模

流体方程只反映了流体共有的运动特性,因此还需根据具体某一类型流体自身的特性对其进行单独建模。对烟幕来说,主要考虑烟幕以下属性:烟幕浓度、速度、压力、温度。其中,烟幕浓度用来体现烟幕的实体,代表每个网格中烟幕颗粒的数量;速度和压力反映内部烟幕颗粒的运动;温度主要体现在上升力和烟幕自身红外辐射的计算。

在对速度进行对流的同时,烟幕浓度和温度也

根据当前速度进行对流:

$$\frac{\partial q}{\partial t}=-\left(u\cdot\nabla\right)q \quad (11)$$

式中: q 代表烟幕浓度或温度。烟幕浓度和温度对流的求解也可采用 Semi-Lagrangian 方法。但是,Semi-Lagrangian 方法会产生平滑效应,导致流体的很多细节丢失。近年来,国内外学者基于 Semi-Lagrangian 方法又发展了许多精度更高的对流方法,如 MacCormack 方法、BFEC (Back and Forth Error Compensation and Correction)方法^[5]、CIP(Constrained Interpolation Profile)方法^[6]等。这些方法虽然精度更高,但计算较为耗时。

为提高流体仿真的精度,可采用增大网格密度和使用更高精度对流方法两种方式来实现。由于文中采用 CUDA 加速技术利用 GPU 进行并行计算,内存间数据传输所耗费时间远大于并行计算所耗费时间。为兼顾仿真逼真度和实时性,文中采用在粗网格下对烟幕进行仿真,利用 Semi-Lagrangian 方法对速度进行对流,而利用 BFEC 方法对烟幕浓度和温度进行对流。实验表明:利用 BFEC 方法对烟幕浓度和温度进行对流后,仿真细节大大增加。BFEC 方法具体可表示如下:

$$\hat{q}^{n+1}=A(q^n)$$

$$\hat{q}^n=A^R(\hat{q}^{n+1})$$

$$q^{n+1}=A\left(\frac{3}{2}q^n-\frac{1}{2}\hat{q}^n\right) \quad (12)$$

式中: A 为一次 Semi-Lagrangian 向前对流; A^R 为一次 Semi-Lagrangian 向后对流; q^n 为某位置对流之前的烟幕浓度或温度值; q^{n+1} 为在该位置进行一次 BFEC 对流后的烟幕浓度或温度值。

为模拟烟幕的消散过程,对烟幕浓度和温度应用指数衰减模型。烟幕浓度衰减模型如下:

$$d'=\beta_1 d \quad (13)$$

式中: d 为烟幕浓度; β_1 为烟幕浓度的衰减系数; d' 为经过一次衰减后的烟幕浓度。而温度的衰减考虑到环境温度因素,其衰减模型如下:

$$T'=T_0+\beta_2(T-T_0) \quad (14)$$

式中: T_0 为环境温度; T 为当前温度; β_2 为衰减系数; T' 为经过一次衰减后的温度。

烟幕浓度与温度的衰减包含在对其进行对流的过程中。

实际热气体会由于热胀冷缩产生一定的浮力。

为反映出烟幕的这种特性,在每一个网格单元中定义上升力,使其与网格当前温度相关,定义如下:

$$f_{by}=c\left(\frac{1}{T_0}-\frac{1}{T}\right)z \quad (15)$$

式中: z 为沿重力向上的单位向量; c 为具有一定物理意义的上升力大小系数。

上升力同样以外立项的形式添加到流体方程中。

1.3 初始化及边界条件

在对烟幕的运动和物理特性进行建模后,还需对仿真区域进行初始化才能够产生烟幕。仿真开始时,烟幕浓度、速度、压力初始化为 0,温度则初始化为环境温度 T_0 。在仿真区域的底部设置烟幕源,以产生连续的烟幕。烟幕源是指在仿真区域中的一小块空间内指定烟幕的初始速度、烟幕浓度等,是烟幕产生的源头。烟幕源的形状、大小可以是多种多样的,可根据仿真需要进行单独设计。文中的烟幕源设计为边缘服从指数衰减的球体,其中烟幕浓度源和温度源的中心位置不变,其中心位置即为烟幕源的中心,而速度源的中心位置则在距烟幕源中心一定范围内随机变化,以此来产生具有动感的烟幕。假定烟幕源的中心位置为 $P_0=(x_0, y_0, z_0)$,则在任意位置 $P=(x, y, z)$ 处网格的烟幕浓度为:

$$d_{ps}=\text{staurate}(d_0e^{-\alpha_1|p-p_0|}+d_p(1-e^{-\alpha_1|p-p_0|})) \quad (16)$$

式中: d_0 为中心位置释放烟幕浓度; d_p 为添加烟幕源前 p 处烟幕浓度; α_1 为烟幕浓度衰减系数,而staurate函数将最终结果限制在 $[0, 1]$ 范围内。

假定速度源中心位置与烟幕源中心位置的随机偏移为 $r=(i, j, k)$,则 p 处的速度为:

$$u_{ps}=u_0e^{-\alpha_2|p-p_0+r|}+u_p(1-e^{-\alpha_2|p-p_0+r|}) \quad (17)$$

式中: u_0 为中心位置释放速度; u_p 为添加烟幕源前 p 处速度; α_2 为速度衰减系数。温度源的分布与烟幕浓度源类似。

由于烟幕仿真在长方体仿真区域的内部进行,因此还需要为速度和压力确定边界条件。文中对仿真区域的上边界和下边界应用了自由滑移边界条件,而对四周边界应用了无滑移边界条件。其中边界定义为最外层网格与内一层网格的交界处。

为自由滑移边界条件时,在边界两侧的速度和压力的垂直于边界方向的分量相同。以速度为例,其数学表达式如下:

$$u_i \cdot n = u_o \cdot n \quad (18)$$

式中: n 为垂直于边界方向的单位向量; u_o 为边界外侧的速度; u_i 为边界内侧的速度。具体实施时,对于速度,只需将边界内侧速度在垂直于边界方向的分量等于 0,而边界外侧速度为 0;对于压力,只需在计算压力时将边界外侧压力等于边界内侧压力。

当为无滑移边界条件时,速度和压力在靠近边界处被强制置零,以此来消除边界对烟幕流动的影响。

由于现实中的烟幕通常要受到横向风的影响,产生横向的漂移和扩散,因此需要模拟出横向风对烟幕产生的效果。与设置速度源的方法类似,只需在仿真区域的四周靠近边界的网格处设置特定的横向风速度矢量场,即可实现对横向风效果的模拟。

2 烟幕红外辐射模型

烟幕的红外辐射主要来源于烟幕自身的红外辐射、太阳光的照射、周围环境辐射等。为简化计算,文中对烟幕进行红外辐射建模仅考虑影响烟幕红外辐射的两个主要因素,即烟幕自身红外辐射和太阳光照射。

2.1 烟幕自身红外辐射

文中将烟幕自身红外辐射简化为灰体辐射模型,且使辐射强度与烟幕浓度成正比^[7]。在任意位置 $P=(x, y, z)$ 处,该网格单元发出的红外辐射强度为:

$$I_p = \alpha d \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} I_{b\lambda}(T) d\lambda \quad (19)$$

式中: $I_{b\lambda}$ 为 T 温度下 λ 波长的黑体辐射; $\lambda_1 \sim \lambda_2$ 为所计算辐射的波段; d 为烟幕浓度; α 为烟幕发射率。

为获得视点处的红外成像,文中采用对烟幕仿真区域进行等间隔采样的光线透射方法,即从成像平面的每个像元引出一条射线,计算途经每一条射线到达视点处的红外辐射,如图 2 所示。

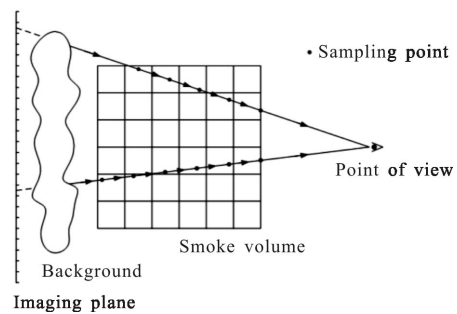


图 2 烟幕辐射成像示意图

Fig.2 Imaging schematic of smoke radiation

背景辐射和射线途经网络的自身红外辐射沿射线累积、散射和衰减最终到达视点。根据辐射传输方程,沿射线到达视点处的辐射强度计算如下:

$$I_e = I_0 \prod_{j=1}^N e^{-\tau_j} + \sum_{j=1}^N (I_{jp} + g_j) \prod_{k=j+1}^N e^{-\tau_k},$$

$$g_j = \alpha_j \cdot \tau_j \cdot p(l, -l) \cdot I_j \cdot \gamma / 4\pi \quad (20)$$

式中: I_0 为背景辐射强度; I_{jp} 为第 j 个采样点处的烟幕自身辐射; τ_k 为第 $k-1$ 个采样点到第 k 个采样点之间的光学厚度; α_j 为第 j 个采样点处的散射反照率; $p(\omega, \omega')$ 为散射相函数; l 为沿射线方向; I_j 为到达第 j 个采样点处的总辐射; γ 为前向散射角。

以上计算烟幕粒子的散射主要考虑了前向散射,这是因为大多数烟幕粒子的散射能量都集中在前向散射上^[8]。式中 γ 为小角度,在该角度范围内,散射相函数的值可认为是不变的。文中采用的散射项函数为 Henyey-Greenstein 相函数^[9],该散射相函数适合描述大粒子的散射特性,其表达式如下:

$$\Phi(\theta) = \frac{1-g^2}{(1+g^2-2g\cos\theta)^{1.5}} \quad (21)$$

式中: θ 为入射与出射方向的夹角; g 为非对称因子。

在具体实施中,对于烟幕自身辐射和散射,首先,计算由视点发出射线与仿真区域的交点,然后,按固定步长以远视点交点为起点逐步计算到达下一个采样点处的红外辐射,直到抵达近视点交点为止。对于背景辐射,则将射线穿透仿真区域的总光学厚度作为烟幕纹理的 α 通道值,利用纹理混合技术对背景辐射进行衰减和叠加。

2.2 太阳光照射

太阳光对烟幕红外辐射特性的影响主要体现在太阳光照射到烟幕上时烟幕粒子对太阳光散射所产生的红外辐射。文中首先计算长方体仿真区域内太阳光经衰减和散射到达每个网格的红外辐射,然后在进行辐射成像时计算采样点处太阳光辐射在视线方向的散射,最后计算太阳光辐射到达视点的辐射强度。

假定太阳光是平行且均匀照射的,则任意位置 $P=(x, y, z)$ 处的光辐射强度表示为:

$$I_{ps} = I_s \prod_{j=1}^N e^{-\tau_j} + \sum_{j=1}^N g_j \prod_{k=j+1}^N e^{-\tau_k},$$

$$g_j = \alpha_j \cdot \tau_j \cdot p(l, -l) \cdot I_{js} \cdot \gamma / 4\pi \quad (22)$$

式中: I_s 为太阳光入射辐射强度; l 为太阳光入射方

向; I_{js} 为第 j 个采样点处的太阳光辐射强度。

计算到达仿真区域网格的太阳光辐射强度同样采用等间隔采样的光线投射方法,即沿太阳光入射方向对太阳光辐射进行逐步衰减和散射,计算到达仿真区域中每一网格的太阳光辐射强度,如图 3 所示。

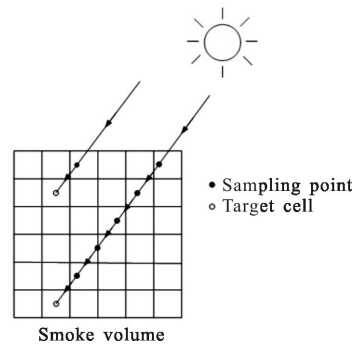


图 3 太阳光辐射入射示意图
Fig.3 Incident schematic of sun radiation

得到到达每一网格的太阳光辐射强度后,在辐射成像时,计算采样点在视线方向的散射。最终计算到达视点的太阳光散射辐射则可与烟幕自身红外辐射进行合并计算。

3 利用 CUDA 加速的烟幕红外仿真

由于基于物理模型的烟幕红外仿真中包含大量的方程求解,且需对仿真区域中每一网格进行单独计算,随着网格数的增加,计算量成指数增长,因此利用 CPU 的串行计算显然不能满足实时性需求。而对于仿真区域每一网格的计算过程相同,因而采用并行计算将会大大加快仿真速度。

文中利用 Nvidia 公司开发的 CUDA 并行计算工具包对烟幕模型进行编程实现。选取 $32 \times 32 \times 64$ 网格作为烟幕仿真区域。利用 3D 纹理来存储各种属性信息,具体包括烟幕浓度、速度、压力、温度、障碍物五种属性。其中障碍物属性用来表示对应网格是否为不可流动区域,如仿真区域的边界或仿真区域中的遮挡物等。

在程序运行的开始,对仿真环境进行初始化,主要包括 3D 纹理的初始化,OpenGL 渲染初始化和黑体辐射查找表的初始化。其中,黑体辐射查找表由普朗克公式在相应波段上积分得到,以纹理的形式进行存储,用于在程序运行时快速地得到对应温度下

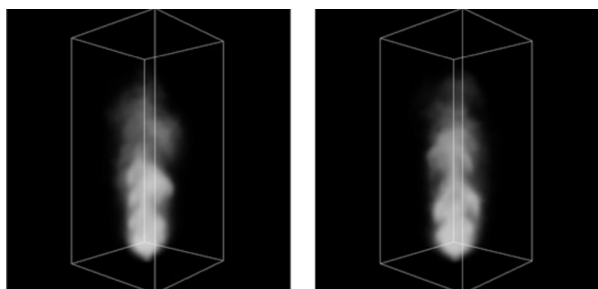
的黑体辐射。在程序运行过程中,以循环的方式执行红外烟幕的模型计算和渲染,循环体主要分为以下步骤:

- (1) 对流速度
- (2) 对流烟幕浓度、温度
- (3) 添加旋度限定力
- (4) 添加上升力
- (5) 添加烟幕源
- (6) 计算速度场的散度
- (7) 通过 Jacobi 迭代求解压力场
- (8) 更新速度场
- (9) 计算网格太阳光辐射强度
- (10) 计算到达视点处红外辐射强度
- (11) 渲染

具体实现时,对以上各步骤分别编写相应的内核程序,以提高程序的可读性和可裁剪性。其中,由于烟幕粘度一般都很小,为提高实时性,以上环节并没有对扩散项进行求解。

文中对烟幕红外仿真过程中各环节分别进行了删减和修改,进行了对比试验,以此来评估各环节的效率高低和效果好坏。采用的实验平台为:CPU Intel Xeon E5-2609 4 核 2.4 GHz; 显卡 NVIDIA Quadro K5000; 内存 4 GB。渲染的图像大小为 512×512。

将红外辐射计算环节去除,利用体绘制技术对烟幕浓度进行渲染,不添加深度测试,烟幕浓度、温度的对流采用 Semi-Lagrangian 方法, Jacobi 分别迭代 10 次和 20 次求解压力场的烟幕效果对比如图 4 所示。



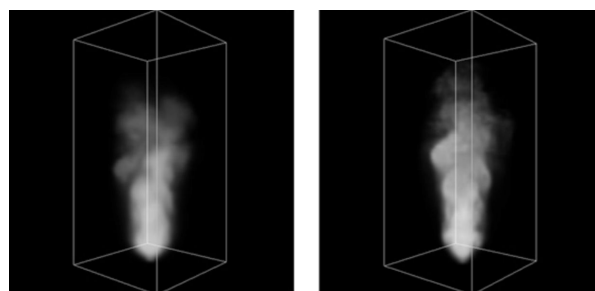
(a) Jacobi 迭代 10 次 (b) Jacobi 迭代 20 次
(a) Jacobi iteration 10 times (b) Jacobi iteration 20 times

图 4 Jacobi 迭代不同次数效果对比

Fig.4 Contrast of effect using different number of Jacobi iteration

图中, Jacobi 迭代 10 次时帧频可达 350 Hz, 而

Jacobi 迭代 20 次时帧频为 300 Hz。将红外辐射计算环节去除,利用体绘制技术对烟幕浓度进行渲染,添加深度测试, Jacobi 迭代 10 次求解压力场, 烟幕浓度、温度的对流分别采用 Semi-Lagrangian 方法和 BFECC 方法对流效果对比如图 5 所示。



(a) Semi-Lagrangian 对流 (b) BFECC 对流
(a) Semi-Lagrangian convection (b) BFECC convection

图 5 Semi-Lagrangian 对流与 BFECC 对流效果对比

Fig.5 Contrast of effect using Semi-Lagrangian convection and BFECC convection

图中, Semi-Lagrangian 对流时帧频为 250 Hz, 而 BFECC 对流时帧频为 210 Hz。添加红外辐射计算环节,添加深度测试,计算中波 3~5 μm 的烟幕辐射强度,太阳光中波辐射强度设置为 0.02 W/(cm²·sr⁻¹),太阳光入射角度为斜向下 30°,辐射强度与屏幕像素值转换系数设置为 1 600, Jacobi 迭代 10 次求解压力场,烟幕浓度、温度的对流采用 BFECC 方法,烟幕源中心温度分别设置为 300 K 和 340 K 时如图 6 所示。

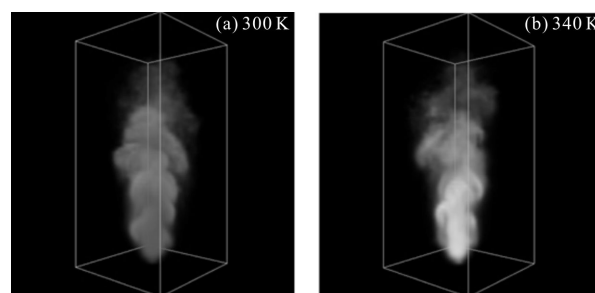


图 6 不同温度烟幕红外效果对比

Fig.6 Contrast of smoke IR effect under different temperatures

图中,温度为 300 K 时帧频为 120 Hz, 而温度为 340 K 时帧频为 120 Hz。

由以上仿真结果可知:深度测试、Poisson 方程求解、BFECC 对流、红外辐射计算是仿真过程中的主要耗时环节。由于实际仿真中,帧频要求通常不会超过 100 Hz, 因此对于 512×512 规模的烟幕红外仿

真,文中方法满足实时性要求。

4 在 Vega 红外场景中应用烟幕效果

Vega 是 Multigen-Paradigm 公司开发的视景仿真软件,其 SensorVision 红外仿真模块可用来生成目标和场景的红外图像。Vega 包含粒子系统,可用来生成各种不规则物体,且 SensorVision 支持粒子系统的红外成像。将基于物理模型生成的红外烟幕图像嵌入到 Vega 红外场景中,使该方法生成的红外烟幕应用到具体的战场环境红外图像动态实时生成过程中,通过与 Vega 粒子系统产生的红外烟幕进行效果对比,检验该方法生成红外烟幕的可行性。

为将红外烟幕嵌入到 Vega 场景中,首先获取 Vega 通道的视景物参数和观察者在场景中的位置和姿态。然后,计算烟幕位置与观察者在场景中的相对姿态,在 Vega 回调函数 postDraw() 中利用 CUDA 对红外烟幕进行渲染产生对应 Vega 通道视景物和观察者与烟幕相对姿态的红外烟幕纹理。最后,利用纹理混合技术将烟幕红外纹理融合到 Vega 生成的红外场景中。

在将红外烟幕嵌入到 Vega 场景的过程中,Vega 场景中的物体有可能对烟幕产生浸润和遮挡现象。为此,文中在进行烟幕渲染时引入了深度测试,即将 Vega 的深度缓冲区保存下来并传递到红外烟幕的渲染内核中,在进行辐射成像时,通过将射线与仿真区域交点的深度值与 Vega 深度值进行比较来确定光线的入射深度,从而得到考虑遮挡之后的烟幕红外图像。深度值 z 的计算公式如下:

$$z = \frac{d_{far} + d_{near}}{d_{far} - d_{near}} + \frac{1}{d} \left(\frac{-2 \cdot d_{far} \cdot d_{near}}{d_{far} - d_{near}} \right) \quad (23)$$

式中: d_{near} 为视景物近裁剪平面实际深度值; d_{far} 为远裁剪平面实际深度值; d 为当前位置的实际深度。

在 Vega 示例的小镇红外场景中,添加基于物理模型的红外烟幕与添加利用 Vega 粒子系统采用 150 个粒子产生的红外烟幕效果对比如图 7 所示。生成图像大小为 256×256。

图 7 中,添加基于物理模型烟幕时帧频为 190 Hz,而添加基于 Vega 粒子系统烟幕时帧频为 350 Hz。

为模拟受横向风影响的红外烟幕,将烟幕仿真空间扩大到 64×32×64,在仿真空间边界处添加均匀横向速度场,产生的横向风效果与 Vega 粒子系统对

比如图 8 所示。

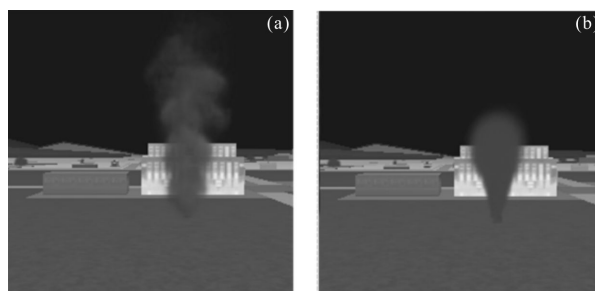


图 7 添加不同烟幕到 Vega 场景效果对比图

Fig.7 Contrast of effect adding different smoke into Vega scene

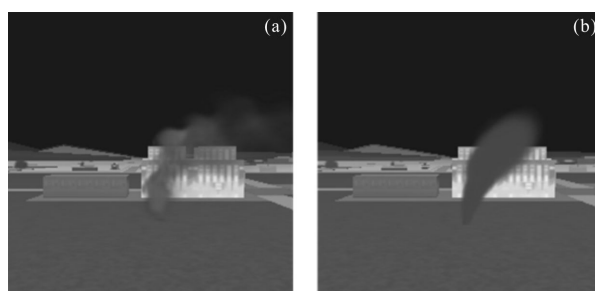


图 8 添加横向风效果对比图

Fig.8 Contrast of effect adding transversal wind

图 8 中,添加基于物理模型烟幕时帧频为 155 Hz,添加基于 Vega 粒子系统烟幕时帧频为 350 Hz。

从以上仿真结果可以看出:基于物理模型的烟幕红外仿真具有更加细腻的烟幕外形,真实感强,且添加横向风效果时更加贴近实际。但是,仿真的烟幕外形仍较现实中的烟幕有一定的差距,如现实中烟幕的扩散效应可能会更加明显,且对于粘性较大的烟幕,其胶体特性也更加显著,为此,可考虑在模型中增加对扩散项的求解,并考虑特定类型烟幕粒子的物理特性建立更加贴近实际的烟幕自身特性模型;实际烟幕的细节丰富程度可能会更高,为此,可采用设计更为复杂的烟幕源模型、应用数值耗散更小的对流方法和增加更加丰富的环境扰动等措施加以改善。

对于烟幕的红外辐射特性模型,主要考虑了烟幕自身辐射和太阳光照射两种因素。然而,实际中烟幕会与周围的空气产生热对流和热交换,为此,可建立烟幕与周围空气的热交换模型,以更加真实地模拟烟幕温度的变化过程;实际烟幕还会受到地面及大气环境辐射的影响,对环境中的红外辐射产生反射和散射,为此,可在模型中添加此类因素的影响。

5 结 论

针对利用粒子系统对不规则物体进行红外仿真的不足,文中以烟幕为例提出了基于物理模型对不规则物体进行红外仿真的一般方法。实验表明,基于物理模型的烟幕红外仿真较粒子系统具有更加逼真的外形,且在运用 CUDA 进行并行计算加速后能够得到较好的实时性。由于是利用物理方程进行建模,模型中的各种参数都具有相应的物理意义,因此基于物理模型的不规则物体仿真在体现不规则物体的多样性上也更加具有灵活性。但是,文中并未对所建立的烟幕红外模型进行评估,烟幕的外形和红外辐射特性的真实性与有效性还需要通过实验^[10]来进一步验证,这也是下一步主要开展的工作。

参考文献:

- [1] Liao Shouyi, Su Delun, Zhang Jinsheng, et al. Real-time measures for image generation system of IR imaging target simulator[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2010, 39(3): 377-382. (in Chinese)
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.
- [2] Wu Xin, Zhang Jianqi, Huang Xi, et al. GPU-accelerated real-time IR smoke screen simulation and assessment of its obscuration [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2012, 55: 150-155.
- [3] Yang Bailin, Chen Shaoye, Wang Cong. GPU Gems 3[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2010: 483-514. (in Chinese)
杨柏林, 陈绍业, 王聪. GPU 精粹 3 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2010: 483-514.
- [4] Ronald Fedkiw, Jos Stam, Henrik Wann Jensen. Visual simulation of smoke [C]//Annual Conference on Computer Graphics-SIGGRAPH, 2001, 1145: 15-22.
- [5] Byung Moom Kim, Liu Yingjie, Ignacio Llamas, et al. Flowfixer: Using bfccc for fluid simulation[C]//Eurographics Workshop on Natural Phenomena, 2005, 2312: 51-56.
- [6] Doyub Kim, Oh-young Song, Hyeong-Seok Ko. A semi-lagrangian CIP fluid solver without dimensional splitting[J]. *Computer Graphics Forum*, 2008, 27(2): 467-475.
- [7] Li Hongning, Bai Tingzhu, Wang He, et al. Smoke model for infrared scene imaging simulation and characteristic analysis [J]. *Journal of System Simulation*, 2011, 23(10): 2248-2253. (in Chinese)
李宏宁, 白廷柱, 王贺, 等. 用于场景仿真的红外烟幕模型及其特性分析 [J]. 系统仿真学报, 2011, 23(10): 2248-2253.
- [8] Mark J Harris, Anselmo Lastra. Real-time cloud rendering [J]. *Computer Graphics Forum*, 2001, 30(3): 76-85.
- [9] Tan Heping, Xia Xinlin, Liu Linhua, et al. Numerical Calculation of the Infrared Radiation Characteristics and Transmission [M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 2006: 107-118. (in Chinese)
谈和平, 夏新林, 刘林华, 等. 红外辐射特性与传输的数值计算 [M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2006: 107-118.
- [10] Huang Xi, Zhang Jianqi, Zhang Shaoze, et al. Realistic infrared image generation method of target [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(4): 1084-1088. (in Chinese)
黄曦, 张建奇, 张绍泽, 等. 目标高真实感红外图像生成方法 [J]. 红外与激光工程, 2013, 42(4): 1084-1088.