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

廖惟博[1)], 赵霄洋[2)], 张　繁[3)], 郑尚达[1)], 王章野[1)*]

[1)] (浙江大学 CAD&CG 国家重点实验室　杭州　310058)
[2)] (北京空间飞行器总体设计部　北京　100094)
[3)] (浙江工业大学计算机科学与技术学院　杭州　310023)
(zywang@zju.edu.cn)

摘　要: 随着红外热像仪成像分辨率的提高, 已能观察越来越多新的目标红外成像特征. 为探究航拍海面船只红外尾迹的形成原因和具体成像特征, 基于流体动力学和红外物理学原理, 提出一种海面船只红外尾迹建模与绘制新算法. 首先使用体素化将船体转化为固体粒子, 以实现固-液耦合效果模拟; 然后提出一种海水垂直面的温度变化模型, 以确定液体粒子的初始温度值分布; 为模拟海上行驶船只的运动及其场景的红外成像特性变化, 提出一种新的结合光滑粒子流体动力学(SPH)模型及海水热传导机制的模型; 最后通过红外成像模型, 成功绘制出海面船只的红外尾迹场景特征图像. 文中所提出的海水热传导机制 SPH 模型除了能模拟船只尾迹的几何形状变化外, 还能求得尾迹区域海水的红外物理特征变化, 并从实验模拟的角度证明了红外尾迹的成像原因. 该算法在海面目标的探测与救援、军事上的红外隐身与对抗等领域都有重要的应用价值.

关键词：自然景象模拟; 海面船只红外尾迹仿真; 真实感绘制; 红外物理学; SPH 热传导机制模型
中图法分类号：TP391.41

Realistic Rendering of Infrared Ship Wake on the Sea Based on Infrared Physics and Hydrodynamics

Liao Weibo[1)], Zhao Xiaoyang[2)], Zhang Fan[3)], Zheng Shangda[1)], and Wang Zhangye[1)*]

[1)] (*State Key Lab of CAD&CG at Zhejiang University, Hangzhou*　310058)
[2)] (*Beijing Institute of Spacecraft System Engineering, Beijing*　100094)
[3)] (*College of Computer Science & Technology, Zhejiang University of Technology, Hangzhou*　310023)

Abstract: With the improvement of the imaging resolution of thermal infrared (IR) imager, more and more new target infrared image synthesis has been observed. To explore the causes and specific image synthesis of IR wake of sea ships from aerial images, we propose a novel modeling and rendering algorithm for IR wake of sea ships based on fluid dynamics and infrared physics in this paper. Our algorithm first hires voxelization to convert the ship body into solid particles for solid-liquid coupling simulation. Then, a vertical temperature distribution model of seawater is put forward to determine the initial temperature value distribution of fluid particles. To simulate the motion and change of infrared synthesis of navigating sea ship scene, a new model combined with smoothed particle hydrodynamics (SPH) and seawater heat conduction mechanism is proposed. Finally, realistic infrared ship wake scenes are successfully rendered according the infrared image synthesis model. Our method can simulate not only the geometric change but also the IR physical feature

收稿日期: 2016-07-14; 修回日期: 2016-10-08. 基金项目: 国家“八六三”高技术研究发展计划(2015AA016404); 国家自然科学基金(61272302, 61303141). 廖惟博(1990—), 男, 博士研究生, 主要研究方向为计算机真实感图形、基于物理的场景模拟、虚拟现实; 赵霄洋(1986—), 男, 硕士, 主要研究方向为卫星总体设计、图像处理; 张　繁(1978—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为计算机图形学、可视分析; 郑尚达(1994—), 男, 在校学生; 王章野(1965—), 男, 博士, 副教授, 论文通讯作者, 主要研究方向为计算机真实感图形、虚拟现实、可视分析、红外成像仿真.

change of the ship wake area. We thus prove the causes of IR ship wake image from the view of experimental simulation, which can be found potential applications in the domains such as target detection and rescue on sea surface, and the infrared stealth and countermeasure in the military affairs, etc.

Key words: natural phenomena simulation; infrared ship wake simulation; realistic rendering; infrared physics; heat transfer mechanism based SPH model

目前，计算机图形学的光照成像模型大多是基于可见光波段的，已能照片级真实感地模拟出光的反射、吸收、折射、透射等几何光学现象，还能模拟出干涉、衍射等波动光学现象[1-2]. 现实世界的物体除了发射人眼所能感受到的可见光(位于380 nm~760 nm 的电磁波)以外，还发射许多人眼所不能感知的其他波段(如红外线、紫外线、X 射线、γ 射线、微波等)的信息. 可见光只是电磁波谱图中很窄的一段，如何将计算机图形学的理论和建模绘制方法有效地推广到这些非可见波段的成像仿真中，并将这些广阔波段的成像技术有效地合成，必能使人类的视觉由原有的可见光向全面的波段扩展，大大加强人类认识世界的能力[3].

由于红外波段成像具有在云雾及浓烟等恶劣条件下出色的穿透成像能力、以及在夜间温差成像的探测能力，对常见的可见光成像构成时空上的相关性及信息上的互补性.

近年来，随着红外热像仪成像分辨率的提高，已能观察到越来越多的目标的红外特征，航拍海面船只的红外尾迹特征即是其中之一，这一现象为夜间及恶劣气象条件下海面目标的探测与跟踪提供了一种新的有效途径. 但有关该现象成像机制的研究及可视化展示的工作，至今尚未见报道.

本文对该现象中的物理机制进行探究，分析其特征形成原因及过程，为今后计算机图形学的拓展应用提供一种新的建模与绘制方法.

1 相关工作

传统的船只尾迹模拟主要通过数值模拟的方法进行仿真，分为势流方法和粘性流方法[4]. 前者具有计算速度快、容易实施等优点，是研究自由表面的重要方法；后者基于数值求解方法求解 RANS 方程，在水动力学数值研究领域占主导地位[4]. 文献[5-6]基于 RANS 方程、NUBBS 等应用数值计算的方法研究可见光下尾迹特征；文献[7-8]运用线性叠加法研究尾迹与海浪的叠加方法. 现有方法很好地模拟了海洋船只尾迹的可见光特征，但对于物体红外特征的模拟与仿真，没有给出解决方案. 如图 1[3]所示可见光只是电磁波谱图中很窄的一段，而其他波段的信息存在更多的特征，与可见光形成了信息上的互补，若能充分挖掘其他波段(如红外波段)的成像特征，则有利于对目标的探测和识别. 本文从海水的流体模拟及海面场景红外热传导成像模拟这 2 部分，对尾迹红外特征的模拟和仿真进行讨论.

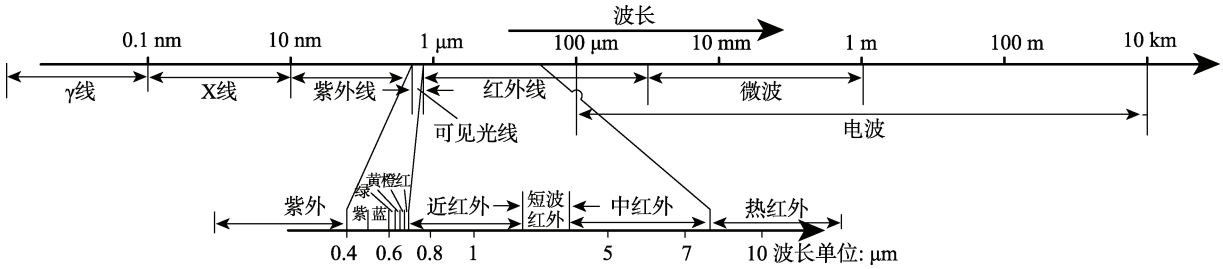


图 1 电磁波谱图

在海水的流体模拟方面，目前主要有 2 类方法：一类是基于非物理的方法，包括过程纹理[9]、元胞自动机[10]和基于统计的快速傅里叶变换(fast Fourier transform, FFT)[11]等，这类方法并不严格考虑流体型景象产生及运动的物理机制，场景绘制的速度较快，但景象细节的真实感则有待提高；另一类是基于物理的方法[12]，以著名的 Navier-Stokes (N-S)方程为基础. 基于物理的方法又分为 3 种：1) 基于统计的格子玻尔兹曼方法(Lattice-Boltzmann method, LBM)[13]；2) 从流体占据的空间中各固定点出发，

分析各空间点上流体的速度、压力、密度等参数随时间的变化, 该方法被称为欧拉(Euler) 法[14], 是一种基于网格的方法; 3) 是从分析流体各个微团的运动出发, 研究各物理量的变化进而研究整个流体的运动, 被称为拉格朗日(Lagrangian)法[15], 是一种基于粒子的方法.

LBM 是基于统计规律的方法, 因此其模拟的精确度粗, 模拟细节不足; 欧拉方法对不同尺度场景的适应性较差, 不能很好地模拟水面如浪花飞溅及泡沫等精细效果. 近年来, 越来越多的研究工作转向了基于粒子的拉格朗日法的流体模拟, 其中光滑粒子流体动力学(smoothed particle hydrodynamics, SPH)方法[16]更是被广泛研究.

Stam 等[17]首次采用 SPH 方法成功模拟了火焰及气体的扩散现象, Stam 等[17]亦将 SPH 方法引入流体模拟中, Müller 等[18]采用粒子系统来模拟水体运动, 并可达到较快的计算速度及绘制效果; Müller 等[19]还研究了流体与可变形固体之间的相互作用效果.

Losasso 等[20]提出一种结合粒子水平集和 SPH 这 2 种技术来模拟流体的运动的新方法, 该方法采用粒子水平集技术来对密度大的液体主体进行有效的建模, 采用 SPH 方法来模拟四散的浪花区域, 较好地综合了这 2 种技术的优势, 在保证系统稳定性的前提下能同时模拟集中及四散部分的水体, 并较真实感地绘制出海浪撞击灯塔和海滩的景象. 王章野等[21]提出一种基于各向异性的表面光滑模型, 在 SPH 框架下实现了屏幕空间流体场景的真实感实时绘制.

但是, 现有的 SPH 方法只是模拟了流体空间运动, 而结合流体粒子之间的热传导这一物理机制的流体运动研究尚未见报道.

在红外成像仿真方面, Wang 等[22]提出了全局的红外成像光照明模型, 适用于大规模的复杂城市场景. 在海洋场景的红外目标仿真方面, 韩玉阁等[23]根据海洋表面粗糙度与发射率和吸收率的关系建立海洋表面的红外辐射计算模型, 获得了海洋表面的红外辐射分布特性, 从而生成了海洋表面红外热像图. 李良超等[24]利用大气传输软件 Modtran 计算天空背景和太阳的红外辐射, 基于 JONSWAP 海谱模型构建二维海面, 基于热辐射理论和粗糙面散射理论分别计算海面和目标的红外辐射及对背景辐射的散射, 生成了海天背景红外仿真图像.

在海面船只红外特征仿真方面, 沈国土等[25]基于海面船目标红外图像理论模型,将目标和背景的红外辐射进行合理融合, 模拟出舰船在海天背景下的红外热成像.

在船只尾迹的红外特征仿真方面, 陈彬等[26]采用预先建好的 Kelvin 尾迹绑定于舰船尾端, 并将红外辐射的温度场计算放入 GPU 中加速处理, 初步实现了舰船尾迹的红外绘制生成. 张士成等[27]根据势流理论和面元法模拟了水下航行体在海面上产生的波浪尾迹, 生成了海面波纹尾迹的红外特征图像.

但是, 以上方法注重于舰船尾迹的几何形状对应的红外特性, 没有考虑水体之间的热传导物理效应, 且模型较为简单, 缺乏海面红外场景的真实感.

随着红外热像仪成像分辨率的提高, 目前已能观察到越来越多的微小温差场景目标的红外特征, 其中海水的垂直分布存在温度差异, 由舰船发动机螺旋桨卷起产生的不同深度(有不同的温度)的海水分布于海水表面, 从而在航拍或星载红外成像探测仪上产生明显的红外尾迹区域特征, 这将是非常重要的目标探测特征. 但对此现象的红外仿真建模的工作未见报道.

本文基于红外物理学和流体动力学原理, 提出一种海面船只红外尾迹建模与绘制的算法. 该算法采用光滑粒子水动力学 SPH 模型来模拟海水的运动; 为提高场景处理的效率并实现海面场景船只和海水的固-液耦合的效果, 采用体素化技术将船体转化为相应属性的 SPH 粒子; 为模拟海面船只尾迹区域的红外动态效果, 基于经验数据建立海水垂直面的温度变化模型, 在此基础上建立起包含海水热传导物理机制的新的 SPH 方法; 通过求解此新的基于热传导的 SPH 方法, 不仅可以获得船只尾迹的几何形状变化, 而且能求得该尾迹区域的海水温度场的动态变化分布. 最终, 通过红外成像绘制模型, 成功地绘制出海面船只的红外尾迹特征的真实感场景图像.

2　SPH 模型

在 SPH 模型中, 连续的流体视为由多个相互作用的粒子组成, 流体中的每一个位置的属性都由其附近的粒子属性来决定. 每个粒子属性由

位置 x_i、质量 m_i、速度 $\boldsymbol{u}_i$ 以及温度 T_i 构成，本文中，所有水粒子(用来模拟水体的粒子)的质量 m_i 都相等. 每个粒子都只会影响在其光滑核半径 r 内的所有区域. 每个粒子除受到重力以外还会受到在其邻域内(即在其光滑核半径 r 内)的粒子的压力和粘度. 粒子 p_i 受到邻域内所有粒子作用力

$$\boldsymbol{F}_i^{\text{pressure}} = -\sum_j \frac{m_i(p_i + p_j)}{2\rho_j} \nabla W_{\text{spiky}}(\boldsymbol{x}_j - \boldsymbol{x}_i, r) \quad (1)$$

$$\boldsymbol{F}_i^{\text{viscosity}} = \mu \sum_j m_j \frac{\boldsymbol{u}_j - \boldsymbol{u}_i}{\rho_j} \nabla^2 W_{\text{viscosity}}(\boldsymbol{x}_j - \boldsymbol{x}_i, r) \quad (2)$$

其中，单个粒子产生的压力 $p = K(\rho - \rho_0)$, K 为流体相关常数，ρ_0 是流体静态密度；μ 为黏度，$\rho_i = \sum_j m_j W_{\text{poly6}}(\boldsymbol{x}_j - \boldsymbol{x}_i, r)$，以上使用的光滑核函数公式为

$$W_{\text{spiky}}(\boldsymbol{x}_j - \boldsymbol{x}_i, r) = \begin{cases} K_{\text{spiky}}(r - x_{ji})^3, & 0 \leqslant x_{ji} \leqslant r \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3)$$

$$\nabla^2 W_{\text{viscosity}}(\boldsymbol{x}_j - \boldsymbol{x}_i, r) = \begin{cases} K_{\text{viscosity}} \left(-\dfrac{x_{ji}^3}{2r^3} + \dfrac{x_{ji}^2}{r^2} + \dfrac{r}{2x_{ji}} - 1 \right)^3, & 0 \leqslant x_{ji} \leqslant r \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (4)$$

$$W_{\text{poly6}}(\boldsymbol{x}_j - \boldsymbol{x}_i, r) = \begin{cases} K_{\text{poly6}}(r^2 - x_{ji}^2)^3, & 0 \leqslant x_{ji} \leqslant r \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (5)$$

其中，$x_{ji} = \left| \boldsymbol{x}_j - \boldsymbol{x}_i \right|$，在三维情况下，系数 $K_{\text{spiky}} = \dfrac{15}{\pi \times r^6}$, $K_{\text{viscosity}} = \dfrac{15}{2\pi \times r^3}$, $K_{\text{poly6}} =$，$\dfrac{315}{64\pi \times r^9}$. 根据式(1)(2)即可模拟出各个水粒子的运动轨迹，实现对海水的仿真[28].

3 固液耦合

考虑到 SPH 方法的效率难以支持大规模场景计算，因此使用船只作为系统运动参考系. 假设视距外海洋粒子均匀分布，粒子速度大小为船只航行速度相同，粒子速度方向与船只航行方向相反. 由于固体恒定静止，因此使用单向耦合，只考虑固体对液体的作用力.

3.1 船体的体素化处理

考虑到红外尾迹的产生的原因可能是螺旋桨将下层温度较冷的海水卷到海面上，因此需要加入固-液耦合效应的处理. 本文系统中使用的方法是将螺旋桨体素化，生成与水粒子性质相同的但粒子与粒子之间距离不变，更加紧密的粒子群，利用 SPH 直接实现固体与液体的交互. 体素化是将物体的表面几何形式表示转换成最接近该物体的体素表示形式，产生体数据集. 体素可以理解为分布在三维网格中的立方体单元，本文在每个有效的立方体单元的中心点创建粒子.

首先获取三维模型的最大、最小的 2 个顶点 $(x_{\max}, y_{\min}, z_{\max})$ 和 $(x_{\min}, y_{\min}, z_{\min})$；并以这 2 个对角顶点形成一个包围盒. 包围盒沿 x, y, z 轴的长度分别为 $L_x = x_{\max} - x_{\min}, L_y = y_{\max} - y_{\min}, L_z = z_{\max} - z_{\min}$. 设要创建的三维网格分辨率为 (R_x, R_y, R_z)，则每个立方体单元的大小为 (c_x, c_y, c_z)；其中，$c_x = \dfrac{L_x}{R_x}$, $c_y = \dfrac{L_y}{R_y}$, $c_z = \dfrac{L_z}{R_z}$. 每个单元都有一个标志位，标志位满足关系

$$F(x, y, z) = \begin{cases} 1, & \text{if } F(x, y, z) \text{ 在模型边界上} \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}.$$

体素化要对模型的所有三角面片进行，体素化主要分三部分：三角面顶点的体素化，三角面边的体素化和三角面的体素化.

三角面顶点的体素化即对点的体素化. 设点 $P(x, y, z)$，则其所在的立方体单元位置为 $\left(\dfrac{x - x_{\min}}{c_x}, \dfrac{y - y_{\min}}{c_y}, \dfrac{z - z_{\min}}{c_z} \right)$，该次计算除法向下取整. 将该立方体单元的标志位置为 1，依次将三角面的 3 个顶点做同样处理即可.

三角面边的体素化即将边化为体素点，再用对点体素化的方式进行体素化. 设三角面边上 2 个点的坐标分别为 $(x_1, y_1, z_1), (x_2, y_2, z_2)$. 比较 $|X| = |x_1 - x_2|$，$|Y| = |y_1 - y_2|$，$|Z| = |z_1 - z_2|$ 的大小，取最大的. 假设 x 轴方向最大，则按在 x 轴上以 $\dfrac{c_x}{2}$ 为每段长度取边上的点，对其进行依次体素化即可.

三角面的体素化将面转化为多条边，再用边的体素化方式体素化. 找出最长的那条边长 V，等长度取点与三角面上的第 3 个顶点为一条边进行边的体素化处理[29]. 图 2 所示为螺旋桨体素化后用小球模型作为粒子的显示效果，其中白色为螺旋桨的体素粒子，其他颜色为不同温度的水粒子

(颜色越亮代表温度越低).

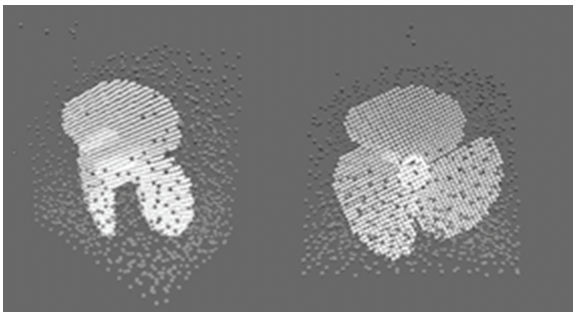


图 2　水粒子与体素化后的螺旋桨效果图

3.2　边界问题

正文将船体体素化的粒子视为位置不变的边界 SPH 粒子, 粒子质量根据船体材质进行设置. 使用 $\rho_i=\sum_j m_j W_{\text{poly6}}(\boldsymbol{x}_j-\boldsymbol{x}_i,r)$ 计算粒子密度, 并使用式(1)(2)计算固液耦合的压力与摩擦力.

由于使用船体作为运动参考系, 船体体素化的粒子速度恒定为 0 不发生变化, 船体螺旋桨恒定绕轴圆周运动, 外力不对其运动造成影响, 因此无需对船体粒子进行力学计算.

4　基于热传导机制的 SPH 模型

欲获得海面船只的红外尾迹仿真图像, 必须首先得到指定海域的垂直海面的温度分布场; 另外, 要描述海面船只尾迹区域的动态红外特征, 不仅要利用 SPH 方法求解出海水粒子的运动规律, 还要求解出考虑水粒子之间的动态热传导机制.

4.1　海水的垂直温度场分布

海水温度是反映海水热状况的一个物理量, 不同的大洋水域在不同季节的表面水温均不相同. 水温垂直分布主要有垂直均匀、正梯度和负梯度 3 种类型[30]. 其中, 垂直均匀型是指从海面到海底水温差异极微(水温垂直变幅≤0.3℃, 最大的垂直梯度值≤0.05℃/m); 正梯度型又称逆温型, 表现为海水温度随深度的增加而递增; 负梯度型是指海水随深度增加而降低. 本文以第 3 种的负梯度型为例.

假设在海水深度为 z 时的海水温度为 $T(z)$, 则

$$T(z)=az^3+bz^2+cz+T_0 \tag{6}$$

其中, a,b 和 c 皆为常数, T_0 为海水表面的温度. 以我国东海某海域作为目标海域, 则其夏季的海水温度垂直分布场根据历史经验值可改写为

$$T(z)=0.0003z^3-0.0093z^2-0.0922z+27.663 \tag{7}$$

由此, 可以求得该海域不同深度的海水温度的分布.

4.2　温度对海水密度的修正

水分子为四面体结构, 水分子之间沿四面体法相方向存在氢键连接, 构成了一个空旷的结构. 由于氢键键能较小, 在温度变化时很容易破裂, 导致水分子间距离的变化进而导致温度的变化. 根据实验测定数据[31], 水的密度可定量的表示为

$$\frac{1}{\rho}=AT+\frac{B}{T} \tag{8}$$

其中, A=1.8105×10^{-3} mL·(K·kg)$^{-1}$, B=138.08 mL·K·kg^{-1}. SPH 在计算某粒子密度时, 需使用式(8)进行密度修正. 表 1 数据为 1 毫克水的体积可以看出, 计算值和实验值基本一致, 这从另一方面间接证实了本文仿真结果的可信度.

表 1　实验值与计算值比较

温度/℃	计算值/mL	实验值/mL
−10	1.00115	1.00186
4	0.99999	1.00000
7	1.00009	1.00007
13	1.00062	1.00060
17	1.00121	1.00120
20	1.00177	1.00177
27	1.00346	1.00347
37	1.00673	1.00669
47	1.01092	1.01072

4.3　热传导 SPH 模型

为获取船只在海水中航行产生稳定尾迹后的海表面温度场, 需要在 SPH 中加入因温度差异引起的热传导因子的计算处理模型.

Jeong 等[32]将二阶导的瞬态热传导方程分解成 2 个一阶导的偏微分方程, 用 SPH 算法对偏微分方程在空间域进行离散, 得到关于时间的一阶常微分方程; 再用积分法求解离散后的一阶常微分方程, 得到结构各瞬时的物理量. 本文采用类似的 SPH 方法来求得不同时刻的温度场的瞬时分布值.

本文参考文献[33]的镜像粒子法, 在系统中实现类似的边界粒子以处理相应的边界问题. 因为本文所模拟的是海水的运动, 所以边界粒子意味着无边的海洋, 其属性与水粒子相同, 且水粒子与边界粒子也有力的作用与温度的传导; 同时可借助设置边界粒子的温度梯度来实现对海水的温度梯度的设置, 也可通过设置边界粒子来设定海水的流动方向与速度. 系统中海水温度随深度变化的规律为

$$q_i = \sum_j (T_j - T_i)\frac{m_j}{\rho_j}\nabla^2 W_{\text{viscosity}}(\boldsymbol{x}_j - \boldsymbol{x}_i, r) \tag{9}$$

式(9)表示每个海水粒子 p_i 从其邻域内所有粒子通过热传导获取的热量.

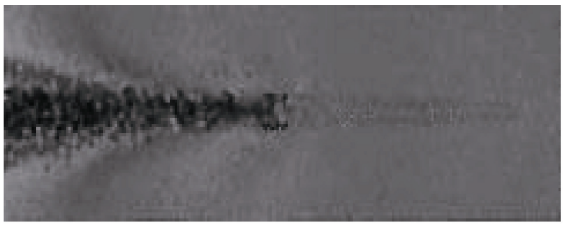
根据 $\Delta T = \frac{q_i}{cm_i}$ 可求得每个海水粒子的温差变化, 其中, c 为海水比热 $3.89\times10^3\,\text{J}\cdot(\text{kg}\cdot℃)^{-1}$.

5 船只红外尾迹特征的绘制

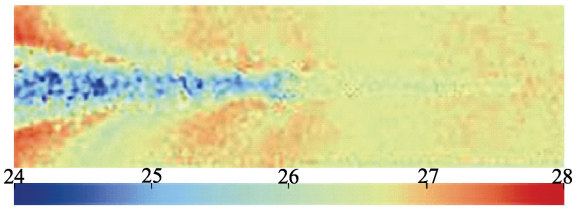
为实现海面船只的红外尾迹的绘制, 需要获取海表面的温度场分布, 输出温度场的方式也同样需要像体素化那样建立三维网格. 每个三维采样点的温度 t_i 都会受到在其光滑核半径内的水粒子(不包括边界粒子)的影响,

$$t_i = \frac{\sum_j (r^2 - x_{ji}{}^2)^3 \times T_j}{\sum_j (r^2 - x_{ji}{}^2)^3} \tag{10}$$

假设每个三维采样点默认的初始温度为–10℃, 计算每个三维采样点的温度后得到三维温度场. 依然保持–10℃的点为空气点, 其他点为水粒子点. 逐层遍历, 记录最表层的水粒子点的温度, 即为水表面温度分布, 以灰度图的形式输出如图 3a 所示, 其中黑色部分即为尾迹, 伪彩图效果如图 3b 所示. 图 3 中, 温度单位为℃.



a. 灰度图



b. 伪彩图

图 3 尾迹温度分布图

求得海面区域的三维温度场以后, 可基于红外成像模型[34]对此三维红外场景进行真实感绘制. 根据红外物理学的 Planck 红外辐射公式, 温度为 T 的场景物体的红外辐射强度由

$$E = \varepsilon_0 \cdot \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{C_1}{\lambda^5}\frac{1}{\mathrm{e}^{\frac{-C_2}{\lambda T}} - 1}\mathrm{d}\lambda \tag{11}$$

决定. 其中, C_1 为第 1 辐射常数, 其值为 $3.742\times10^{-16}\,\text{W}\cdot\text{m}^2$; C_2 为第 2 辐射常数, 其值为 $1.4388\times10^{-2}\,\text{m}\cdot\text{K}$; ε_0 为物体表面发射的黑度; $\lambda_1 \sim \lambda_2$ 为红外热成像仪的探测波段. 常用的红外探测器的探测波段有 2 种: 一种是中红外波段, 其值为 3~5 μm; 另一种是热红外波段, 其值为 8~14 μm, 本文所选的红外仿真波段为后者的热红外波段.

由于式(11)的计算量过大, 可采用近似公式

$$E = \varepsilon_0 \frac{C_1}{C_2/T}\mathrm{e}^{-C_2X/T}\cdot\left\{X^3 + \frac{3}{C_2/T}\cdot\left[X^2 + \frac{2}{C_2/T}\left(X + \frac{1}{C_2/T}\right)\right]\right\}_{X=\frac{1}{\lambda_1}}^{X=\frac{1}{\lambda_2}} \tag{12}$$

来代替, 其计算量可大大降低, 且可证明其误差率不超过 1%. 假设海面场景中的对应的最高和最低辐射温度分别为 $T_{\max}$ 和 $T_{\min}$, 由式(12)得到相应的辐射强度分别为 $E_{\max}$ 和 $E_{\min}$. 对于辐射强度为 E_i 的表面, 其对应的灰度值为

$$G_i = \frac{E - E_{\min}}{E_{\max} - E_{\min}} \times 255 \tag{13}$$

采用 Gouraud Shading 方法可绘制出海面场景目标的红外图像.

6 实验结果与分析

根据上述模型, 本文实现了海面场景船只红外尾迹特征的绘制.

图 4 所示为航拍俯视角度的船只红外尾迹仿真效果图; 图 5 所示为白天船只的可见光侧视参考图; 图 6 所示为漆黑夜晚时图 5 对应的可见光侧视图(看不见船只目标); 图 7 所示为漆黑夜晚时图 5 对应的红外侧视图, 可以看出, 由于船只尾迹区域的红外特征相当明显, 即使在漆黑的夜晚也可用于此时对海面行驶的船只目标的识别和探测; 图 8 所示为真实拍摄的船只红外尾迹图, 图中的亮线为船只拖拽的捕网, 真实拍摄图片与本文绘制的图片中尾迹的灰度级皆位于 20~30 内, 海面主要灰度级位于 40~60 内, 这就验证了本文绘制结果的真实性及可信性, 但本文的绘制结果在局部细节信息上依然有待改进. 本文实验中采用 Intel(R) Core(TM) i5-4590CPU@3.30 GHz 的 PC 机, 在 100k 粒子下绘制的效率为 0.6 帧/s 左右. 另外, 由于时间关系, 本文中并没有采用 GPU 等并行加速技术, 估计改进后其绘制效率将会有较大的提高.

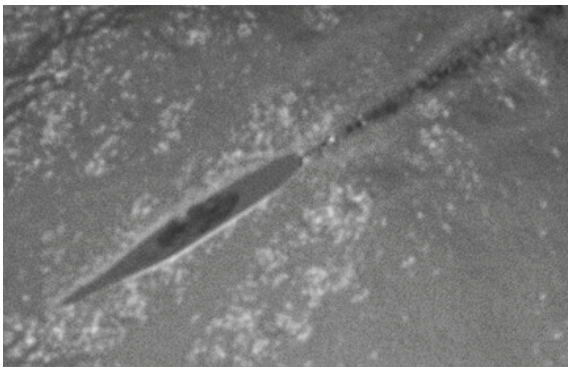


图 4　三维海面场景下的红外尾迹效果图

图 5　三维海面场景下的红外尾迹与可见光对比图

图 6　漆黑夜晚时图 5 对应船只的可见光侧视图

图 7　漆黑夜晚时应船只的红外侧视图

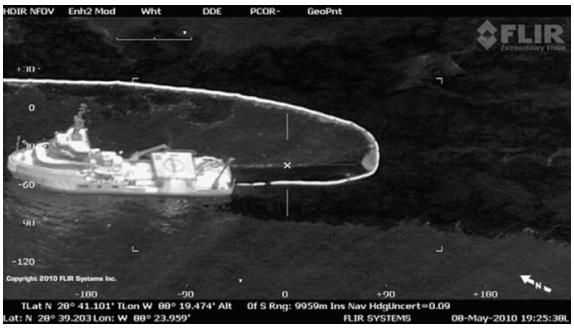


图 8　真实拍摄的船只红外尾迹图

7　结　论

基于红外特征的目标识别和探测技术已得到了越来越广泛的应用. 红外成像的机制是温差辐射成像, 并对云雾有较强的穿透成像能力, 因此在恶劣的气象条件及夜晚的目标探测能力要远强于可见光波段的探测能力. 随着红外热像仪成像分辨率的日益提高, 已有多方面的探测证据表明, 海面船只的尾迹已成为较明显的红外可探测特征. 但对此现象的物理成像机制的研究则未见报道.

本文基于红外物理学和流体动力学原理, 提出一种新的海面船只红外尾迹建模与绘制的新算法, 能真实感地绘制出海面行驶船只特有的红外尾迹场景图像.

本文的主要贡献如下:

1) 提出一种基于热传导机制的 SPH 模型来模拟海面船只尾迹区域的海水热运动. 该模型不仅能模拟海水的三维空间运动, 同时能模拟海水的三维空间热传导, 从而能绘制出船只尾迹的红外特征场景图像.

2) 通过改进型的红外成像模型, 有效地将计算机图形学的光照模型与物体的红外成像特点相结合, 求得该尾迹区域的海水温度场的动态变化分布, 并考虑气象和地理等因素, 从而成功地实现对海面场景红外特征的模拟.

3) 为提高场景处理的效率, 采用体素化技术将船体转化为相应属性的 SPH 粒子, 并实现了船体和海水的固-液耦合效果以改进场景的真实感; 考虑红外热像仪的 HDR 特性, 最终绘制出一天不同时刻的船只尾迹的红外特性效果, 对于海面目标的探测救援、军事上的红外隐身对抗等领域都将有重要的应用.

今后将改进本文的热传导机制 SPH 模型, 并通过 GPU 加速及场景简化技术来加快求解的过程并扩大计算的场景尺度及细节精度; 与实拍的对应红外船只红外尾迹进行比较, 以进一步完善本文的红外场景仿真模型, 并加以推广运用.

参考文献(References):

[1] Gondek J S, Meyer G W, Newman J G. Wavelength dependent reflectance functions[J]. Computer Graphics, 1994, 28(4): 213-220

[2] Li J, Peng Q S. New illumination model for scenes containing diffraction gratings[J]. Progress in Natural Science, 1998, 8(2): 174-179

[3] Peng Qunsheng, Wang Zhangye. 10000 Scientific problems

information science volume[M]. Beijing: Science Press, 2011: 618-621(in Chinese)
(彭群生, 王章野. 10000 个科学难题信息科学卷[M]. 北京: 科学出版社, 2011: 618-621)

[4] Hou Haiping, Chen Biao, Xu Suqin. A survey: the simulation of the Kelvin wake of a ship on the sea[J]. Ship Science and Technology, 2007, 29(5): 123-127(in Chinese)
(侯海平, 陈 标, 许素芹. 舰船海面 Kelvin 尾迹仿真研究[J]. 舰船科学技术, 2007, 29(5): 123-127)

[5] Hong Fangwen, Chang Yu. Numerical simulation of surface wake for submarine moving in homogeneous fluid[J]. Journal of Ship Mechanics, 2005, 9(4): 9-17(in Chinese)
(洪方文, 常 煜. 均匀流中潜艇水下运动表面尾迹的数值模拟[J]. 船舶力学, 2005, 9(4): 9-17)

[6] Zhan C S, Zou Z J. Numerical solution of the unsteady wave-making problem caused by a submerged body[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2004, 28(6): 957-960

[7] Yao Jihuan, Fang Yidong. Fractal simulationand electromagnetic scattering of dynamic sea[J]. Journal of Xidian University, 1999, 26(6): 763-766(in Chinese)
(姚纪欢, 方艺东. 动态海面的分形模拟及其电磁散射[J]. 西安电子科技大学学报, 1999, 26(6): 763-766)

[8] Li Hui, Guo Chen, Li Xiaofang. 3D simulation ofirregular wake based on Matlab[J]. Journal of System Simulation, 2003, 15(7): 1057-1059(in Chinese)
(李 晖, 郭 晨, 李晓方. 基于 Matlab 的不规则海浪三维仿真[J]. 系统仿真学报, 2003, 15(7): 1057-1059)

[9] Perlin K. An image synthesizer[J]. Computer Graphics, 1985, 19(3): 287-296

[10] Dobashi Y, Kaneda K, Yamashita T, *et al*. A simple, efficient method for realistic animation of clouds[C] //Proceedings of the 27th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques. New York: ACM Press, 2000: 19-28

[11] Fournier A, Reeves W T. A simple model of ocean waves[J]. ACM SIGGRAPH Computer Graphics, 1986, 20(4): 75-84

[12] Bridson R, Müller-Fischer M. Fluid simulation: SIGGRAPH 2007 course notes Video files associated with this course are available from the citation page[C] //Proceedings of ACM SIGGRAPH. New York: ACM Press, 2007: 1-81

[13] Chu N S H, Tai C L. MoXi: real-time ink dispersion in absorbent paper[J]. ACM Transactions on Graphics, 2005, 24(3): 504-511

[14] Foster N, Metaxas D. Realistic animation of liquids[J]. Graphical Models and Image Processing, 1996, 58(5): 471-483

[15] Reeves W T. Particle systems—a technique for modeling a class of fuzzy objects[J]. ACM Transactions on Graphics, 1983, 2(2): 91-108

[16] Monaghan JJ. Smoothed particle hydrodynamics[J]. Annual Review of Astronomy and Astrophysics, 1992, 30: 543-574

[17] Stam J, Flume E. Depicting fire and other gaseous phenomena using diffusion processes[C] //Proceedings of the 22nd Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques. New York: ACM Press, 1995: 129-136

[18] Müller M, Charypar D, Gross M. Particle-based fluid simulation for interactive applications[C] //Proceedings of the ACM SIGGRAPH/Eurographics Symposium on Computer Animation. Aire-la-Ville: Eurographics Association Press, 2003: 154-159

[19] Müller M, Schirm S, TeschnerM, *et al*. Interaction offluids with deformable solids[J]. Journal of Computer Animation and Virtual Worlds, 2004, 15(3/4): 159-171

[20] Losasso F, Talton J, Kwatra N, *et al*. Two-way coupled SPH and particle level set fluid simulation[J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2008, 14(4): 797-804

[21] Wang Zhangye, Zhang Haitao, Shi Xiaojin, *et al*. Realistic rendering of fluid scenes in screen space[J]. Journal of Software, 2012, 23(zk2): 138-148(in Chinese)
(王章野, 张海涛, 施肖菁, 等. 屏幕空间流体场景的真实感绘制[J]. 软件学报, 2012, 23(zk2): 138-148)

[22] Wang Z Y, Peng Q S, Lu Y Q, *et al*. A global infrared image synthesis model for large-scale complex urban scene[J]. International Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2001, 22(8): 1193-1208

[23] Han Yuge, Liu Ronghui, Yi Yimin. Study on infrared radiation characterstics of the surface of the sea[C] //Proceddings of Chinese Society of Engineering Thermophysics. Nanjing: Chinese Society of Engineering Thermophysics Press, 2006: 507-510(in Chinese)
(韩玉阁, 刘荣辉, 宣益民. 海洋表面的红外辐射特性研究[C] //中国工程热物理学会传热传质学学术会议. 南京: 中国工程热物理学会, 2006: 507-510)

[24] Li Liangchao, Wu Zhenseng, Yang Ruike. Infrared images simulation system of sea-sky background[J]. Infrared Technology, 2007, 29(5):288-290(in Chinese)
(李良超, 吴振森, 杨瑞科. 海天背景红外成像仿真系统[J]. 红外技术, 2007, 29(5): 288-290)

[25] Shen Guotu, Yang Baocheng, Cai Jiguang, *et al*. Computerized simulation of infrared images of ship targets on the sea[J]. Infrared and Millim Waves, 2002, 21(1): 14-18(in Chinese)
(沈国土, 杨宝成, 蔡继光, 等. 海面船目标红外图像的计算机模拟[J]. 红外与毫米波学报, 2002, 21(1): 14-18)

[26] Chen Bin, Dai Ying, Ming Delie, *et al*. Infrared simulation research based on warships andocean wake background[J]. Computer & Digital Engineering, 2014, 42(7): 1248-1250(in Chinese)
(陈 彬, 代 莹, 明德烈, 等. 基于海洋背景的舰船及其尾迹红外仿真研究[J]. 计算机与数学工程, 2014, 42(7): 1248-1250)

[27] Zhang Shicheng, Yang Zhen, Yang Li, *et al*. Infrared characterization and detection of free surface wave wake of underwater vehicle[J]. Infrared and Laser Engineering, 2012, 41(10): 2615-2620(in Chinese)
(张士成, 杨 桢, 杨 立, 等. 水下航行体自由表面波浪尾迹红外特征及探测[J].红外与激光工程, 2012, 41(10): 2615-2620)

[28] Adams B, Pauly M, Keiser R, *et al*. Adaptively sampled particle fluids[J]. ACM Transactions on Graphics, 2007, 26(3): Article No.48

[29] Jones M W, Satherley R. Voxelisation: modelling for volume graphics[C] //Proceedings of the Conference on Vision Modeling and Visualization. Saarbrücken: Vision Modeling and Visualization Press, 2000: 319-326

[30] Committee of local chronicles of Fujian province. Fujian province•ocean records[M]. Beijing: Local Records Press, 2002: 111-112(in Chinese)
(福建省地方志编纂委员会. 福建省志•海洋志[M]. 北京: 方志出版社, 2002: 111-112)

[31] Zhang Xiangyu. Handbook of real rejection chemistry[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1986 (in Chinese)
(张向宇. 实甩化学手册[M]. 北京: 国防工业出版社, 1986)

[32] Jeong J H, Jhon M S, Halow J S, *et al*. Smoothed particle hydrodynamics: applications to heat conduction[J]. Computer Physics Communications, 2003, 153(1): 71-84

[33] Zhang Wenjie, Wang Xiaohui, Jiang Shunliang. The SPH method for transient heat conduction function[J]. Chemical Engineering & Equipment, 2010(10): 18-23(in Chinese)
(章文捷, 王小惠, 江顺亮. 瞬态热传导方程的 SPH 法[J]. 化学工程与装备, 2010(10): 18-23)

[34] Wanag Zhangye, Jiang Zhaoyi, Bao Hujun, *et al*. A quantity based illumination model for infrared image synthesis[J]. Chinese Journal of Computer, 2002, 25(9): 897-903(in Chinese)
(王章野, 江照意, 鲍虎军, 等. 基于量子光学的红外成像光照模型[J]. 计算机学报, 2002, 25(9): 897-903)