

# 基于物理的台风建模与绘制

王长波<sup>1, 2)</sup> 朱振毅<sup>3)</sup> 高岩<sup>1)</sup> 谢步瀛<sup>3)</sup> 彭群生<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> (华东师范大学软件学院, 上海 200062) <sup>2)</sup> (浙江大学 CAD&CG 国家重点实验室, 杭州 310058)

<sup>3)</sup> (同济大学虚拟建筑研究室, 上海 200092)

**摘要** 研究台风风场的规律并进行真实感仿真对于灾害预防、评估及宣传等有着十分重要的意义。首先从台风的物理特性出发, 建立了不对称的 3 维台风风场, 可以得到不同情况下台风的强度和风速变化; 然后根据卫星云图的干区移动来预测台风移动路径; 进一步模拟台风风场与物体的交互作用, 实现了台风风场的 3D 可视化仿真预测和动态台风场景的实时绘制, 得到了逼真的仿真效果。

**关键词** 台风风场 真实感建模 快速绘制 物理特性

**中图分类号:** TP391 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-8961(2010)03-51-05

## Physically Based Modeling and Rendering of Typhoon

WANG Changbo<sup>1, 2)</sup>, ZHU Zhenyi<sup>3)</sup>, GAO Yan<sup>1)</sup>, XIE Buyang<sup>3)</sup>, PENG Qunsheng<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> (Software Engineering Institute, East China Normal University, Shanghai 200062)

<sup>2)</sup> (State Key Laboratory of CAD&CG, Zhejiang University, Hangzhou 310058)

<sup>3)</sup> (Visual Architecture Laboratory, Tongji University, Shanghai 200092)

**Abstract** It is of much significance for disaster rescuing, evaluating and propaganda to do the research of the typhoon wind-field rules and realistic simulation. Based on physical characteristics of typhoon, this paper first builds the 3D asymmetry typhoon wind-field model and through simplifying and dispersing calculates different wind speeds in different conditions. Then combined with the real-time satellite images, the profile, intensity, track and moving velocity of typhoon are simulated. Further, considering the movement under different conditions for different rigid and flexible objects, and using these realistic rendering technologies, we simulated the dynamic typhoon scene successfully based on its characteristics finally. The simulation results are very realistic.

**Keywords** typhoon wind-field, realistic modeling, quick rendering, physical characters

## 0 引言

台风是最重要的灾难气候之一, 中国东南沿海地区是世界上台风最集中的地区之一, 台风及由此引起的狂风、暴雨、巨浪和风暴潮等灾害给当地人民

的生命财产造成了巨大损失。据统计, 中国 1990 年~2000 年间死于台风的人数约 8 123 人, 年平均直接经济损失约为 81.6 亿元人民币。因此目前对台风防风抗灾方面的研究受到越来越多的关注, 计算机仿真作为一种重要的研究手段越来越多地应用于台风灾难的预防、评估及灾难求援等方面。真实

**基金项目:** 国家自然科学基金项目 (60603076); 国家高技术研究发展计划 (863) 项目 (2007AA01Z316); 上海市青年科技启明星计划项目 (08QA14025); 上海市科委自然科学基金项目 (07ZR14035); 浙江大学 CAD&CG 国家重点实验室开放基金项目 (A1008); 上海市科委科技攻关项目 (09511500100); 上海海事大学重点学科开放基金项目 (S30602)

**收稿日期:** 2008-07-30 **改回日期:** 2008-10-20

**第一作者简介:** 王长波 (1976—) 男, 副教授。2006 年获浙江大学 CAD&CG 国家重点实验室计算机图形学博士学位。主要研究方向为真实感图形、可视化仿真、虚拟现实等。E-mail: cbwang@cad.zju.edu.cn

感的台风灾难场景仿真也能为影视特技、灾难宣传提供良好的途径。

但是,台风与海面气压场、风场关系密切,变化多端,模拟起来非常复杂。同时在高速风力作用下的运动规律、相互作用和状态变化的复杂性,使得对于台风场景的快速模拟难度很大。

目前,台风的模拟多采用数值方法模拟台风风场。ANSI(American national standards institute)<sup>[1]</sup>和SAA(standards association of australian)<sup>[2]</sup>使用这类方法编制设计风速图。进一步地,研究者们从流体动力学和热力学出发,已经建立了一些台风的风场模型,包括动力模型和经验统计模型<sup>[2-3]</sup>,美国的Russell最早采用经验的台风模型计算模拟台风产生的极值风速,并首先应用于墨西哥湾的台风风速估计<sup>[4]</sup>。随后Batts<sup>[5]</sup>, Tryggvason<sup>[6]</sup>, Georgiou<sup>[7]</sup>等人采用了相似的风场模型对美国佛罗里达和得克萨斯沿海进行了研究。Shapiro在Chow等人的工作基础上采用数值方法求解大气运动的动量方程,可以有效地求解台风风场风速分布<sup>[8]</sup>。Christopher等人采用颜色可视化方法模拟了3维台风<sup>[9]</sup>,但台风的绘制仍相当符号化。另外由于风场是不可见的,目前台风的大多仿真研究都是通过不同的颜色或线条来表现不同的风压和风速,很难给人产生一种真实感,特别是对于非专业人士来说相当难于理解,如Grids(grid analysis and display system)等气象可视化软件。在风场的可视化方面,目前也有许多研究,如通过风场中雨、雪等物体的运动来表现风场。但这些研究多针对影响范围小、变化幅度有限、表现单一等小规模风场场景的仿真。

因此,目前的工作主要还局限于台风的数值模拟及简单可视化仿真。本文首先分析了台风风场的经验模型,随后将台风风场扩展到3维不对称情况下,进行3D台风风场的简化求解和建模;通过卫星云图的干区移动来进行台风移动路径的预测模拟;实现了台风风场的3D可视化仿真预测和台风场景的真实感绘制。

## 1 3维台风风场模型

首先根据台风特点,构建出3维非对称的台风风场模型。

### 1.1 台风的数值模型

台风实质上是一种强烈涡旋风场,经典的台风

模型包括类Rankine涡旋模型、修正的Rankine涡旋模型和Bogus台风模型等<sup>[3-4]</sup>。在Bogus台风模型中,初始时Bogus台风的切向风速分布廓线通常取<sup>[5]</sup>:

$$v = v_m \left| \frac{r}{r_m} \right| e^{\frac{d}{r_m} \left( 1 - \left| \frac{r}{r_m} \right|^d \right)} \quad 0 \leq r \leq \infty \quad (1)$$

式中, $d$ 为控制廓线形状的参数, $v$ 为台风风场的切向风速, $r$ 为距台风风场中心的距离, $r_m$ 为台风风场中心附近最大风速的半径, $v_m$ 为台风中心附近的最大风速。

### 1.2 非对称的台风风场模型

上述台风风场的变化是对称的,但是现实中热带气旋外围的大风圈并非完全对称的,这种非对称性与月际差异、地理分布、台风强度等相关。针对式(1)(取 $d=0.6$ )中的模型,考虑到台风风场的大风圈大多具有“谐波”型的一波非对称结构<sup>[8]</sup>,因此构造如下的正弦函数来拟合台风风场外围大风圈半径:

$$s = p + q \sin(\theta - \theta_0) \quad (2)$$

式中, $s$ 为台风风场大风圈的非对称参数, $\theta_0$ 为相对于台风风场中心的方位角, $p, q$ 均为经验常数。进一步地,由式(3)可得VBogus模型(即式(1))的非对称改进模型:

$$\begin{cases} v(r, \theta) = v_m \left| \frac{r}{r_m} \right| e^{\frac{d}{r_m} \left( 1 - \left| \frac{r}{r_m} \right|^d \right)} & 0 \leq r \leq r_m \\ s = p + q \sin(\theta - \theta_0) & r_m < r \leq \infty \end{cases} \quad (3)$$

### 1.3 3维非对称的台风风场

式(3)反映的是某一个水平高度切面上的台风风速变化,为一个2维模型。而台风视景仿真需要3维风场模型。因此进一步在上述模型基础上加入风速和高度变化,构造了3维非对称的台风风场模型。

根据观测得知,一般来说风速通常随离地面高度增大而增加,增加程度主要与地面粗糙度和温度梯度有关。因此可用指数曲线 $v_z = v_0 \left| \frac{z}{z_0} \right|^\alpha$ 来表示梯度风高度以内的风速廓线,式中, $v_z$ 为在高度 $z$ 处的风速; $v_0$ 为在高度 $z_0$ 处的已知风速; $\alpha$ 为指数(1/3~1/10)。由式(3),可得3维“VBogus”风场改进模型:

$$\begin{cases} v(r, \theta, z) = v_m \left| \frac{r}{r_m} \right| e^{\frac{d}{r_m} \left( 1 - \left| \frac{r}{r_m} \right|^d \right)} \left| \frac{z}{z_0} \right|^\alpha \\ 0 \leq r \leq r_m, \quad \frac{1}{10} \leq \alpha \leq \frac{1}{3} \\ s = p + q \sin(\theta - \theta_0) & r_m < r \leq \infty \end{cases} \quad (4)$$

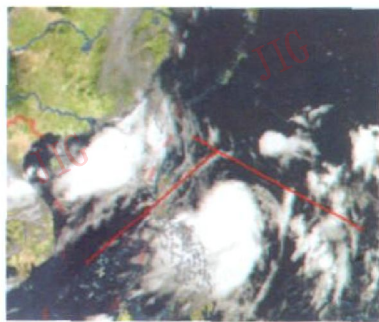
由于考虑了台风的非对称性和 3 维变化, 式 (4) 可以更精确地表征台风的强度。

## 2 台风的移动路径计算

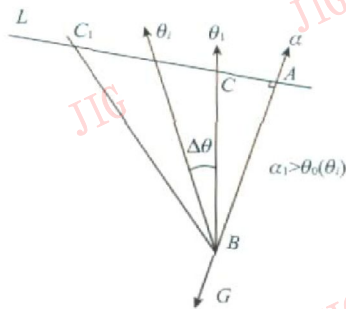
要准确预测台风的运动路径是不太容易的, 目前气象部门多先建立台风随着地球地空温度, 洋流变化等参数的数值模型, 然后采用超级计算机计算出移动路径, 由于台风运动的多变性和模型建立的复杂性, 该模式的预报结果受很多因素影响, 准确度有待提高, 而且计算量极大, 不适用于台风的快速视景仿真。这里采用一种基于卫星云图干区中轴线方法对台风路径进行模拟。

### 2.1 云图干区对台风移动的影响

卫星云图可以反映大气气流变化, 通过观测云图发现, 台风形成后, 台风移向前方及两侧有明显干空气带相伴 (简称为干区)。台风移向前方遇到晴空区的中轴线 (简称干线) 阻挡时, 台风路径将发生偏转。鉴于台风与卫星云图的以上特性, 同时由于卫星云图的实时可获得性, 可以结合实时卫星云图中干区的中轴线来预测台风气流的移动方向。如图 1 (a) 所示, 红色的线即为两张云图中的干线。



(a) 台风干区轴线的确定



(b) 梯度力与惯性力方向示意图

图 1 台风移动路径计算示意图

Fig. 1 The calculation of moving path of typhoon

### 2.2 台风移动轨迹的预测

具体地, 可以由干区中的直线大致确定干湿梯度力方向, 然后求解台风的移向变化。根据梯度力方向与惯性力方向, 由图 1 (b) 可见,  $L$  为当前云图干区中轴线,  $\alpha$  为干线垂直方向,  $G$  为梯度力方向;  $\theta_0$  为当前台风中心的平均移向, 代表惯性力方向。

干线的垂足点为  $A(\phi, \lambda)$ ,  $\theta_0$  方向与干线  $L$  的交点为  $C$ , 台风中心点为  $B$ , 得直角三角形  $BAC$ 。从  $B$  点作一等腰三角形的底边与  $L$  相交于  $C_1$ , 得等腰三角形  $BCC_1$ 。再作底角的平分线, 并将平分线看做两力的合成方向  $\theta$ , 平分角定为偏转量  $\Delta\theta$ 。则:

$$\Delta\theta_i = (90 - |\alpha_i - \theta_{i-1}|) / 4 \quad (5)$$

式中, 当  $\alpha_i > \theta_{i-1}$  ( $\theta_i$ ),  $\Delta\theta_i > 0$  时,  $\theta_i = \theta_{i-1} - \Delta\theta_i$  (逆时针偏转); 当  $\alpha_i < \theta_{i-1}$  ( $\theta_i$ ),  $\Delta\theta_i > 0$  时,  $\theta_i = \theta_{i-1} + \Delta\theta_i$  (顺时针偏转)。若接着受第 2 条干线制约,  $\Delta\theta_{i+1} = (90 - |\alpha_{i+1} - \theta_i|) / 4$ ,  $\theta_{i+1} = \theta_i + \Delta\theta_{i+1}$ 。如此可推:

$$\Delta\theta_{i+1} = (90 - |\alpha_{i+1} - \theta_i|) / 4 \quad (6)$$

$$N = 1 \ 2 \ 3 \ 4 \ \dots$$

式中,  $\alpha$  是干线的特征常数, 每条干线只有一个特征常数。 $\alpha$  可从云图上当前台风中心与干线的走向直接确定。给出  $\theta_0$  后, 可根据  $\alpha$  值求出移动方向  $\theta$ , 把各方向上点的位置连接起来即台风路径。

具体地, 可以载入不同时刻卫星云图, 确定干线位置, 然后计算台风移动路径。云图间隔的时间越长, 预测台风走向的时效也越长。该方法计算台风路径简单快速, 真实云图来源可保证可靠性。

## 3 台风场景的仿真

利用上面确定的台风强度和路径模型, 在时间和空间上离散, 对应每个网格点利用上面的公式计算出风速和风向。为了快速模拟风场, 这里采用自适应风场网格剖分方式, 即在台风中心台风变化比较剧烈的区域采用较密的网格, 而在台风风场的边缘区域采用相对稀疏的网格, 在保证精度的基础上提高计算速度。

进一步对台风下的物体运动进行模拟, 对于刚体运动, 求出物体运动的整体加速度和局部旋转加速度, 进而确定物体各顶点的位置变化, 最终通过坐标变换确定物体网格控制点的坐标。对于树木、花

草、织物等柔性物体,采用分割面片逐渐变形的方法进行模拟,根据所受风力的大小利用弹性理论求出其在空间中的变形量,进而求出各个分割点的最终变化坐标,最后利用 Billboard 技术来实现对该物体变化过程的模拟。

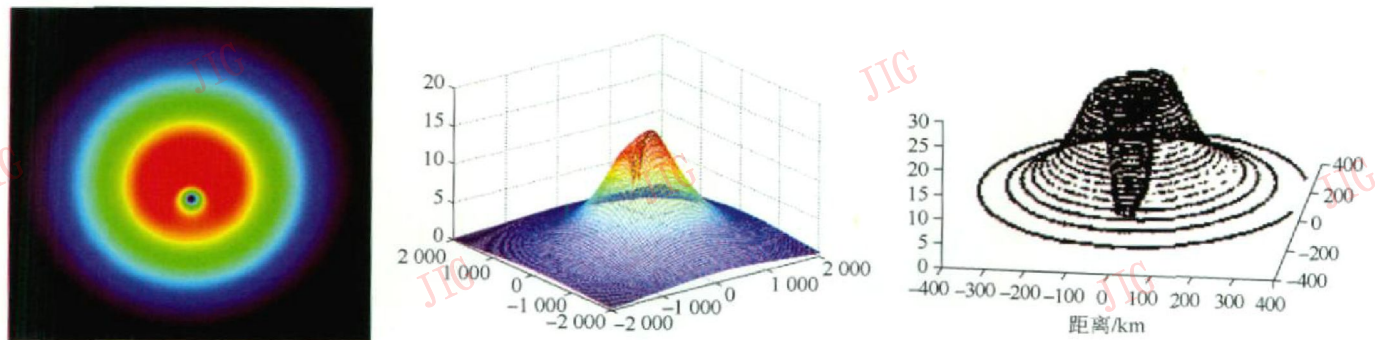
对于台风下的物体碰撞,可结合包围盒技术进行预判。通过碰撞检测技术确定物体的碰撞点,再依据动能和动量定理来计算出物体发生碰撞后的运动方向和速度。

### 4 仿真结果与分析

对不同情况下的台风的强度、移动方向和台风场景进行真实感模拟,由于采用了一系列加速绘制技术,风场模拟及场景仿真速度达到了 20 帧 /s。图 2(a)为 500 m 高度处台风风场的可视化效果图,其中水平方向表示台风风场的不同位置,纵轴高度表示台风风速的大小,图 2(b)是实测的台风风场示

意图。

进一步采用本文算法对 2007 年在福建惠安崇武登陆的 0708 号“圣帕”台风和 0712 号“韦帕”台风进行模拟,图 3 是具体台风模拟结果,其中图 3(a)是“圣帕”台风路径预测,从图中可以看出,“圣帕”台风的计算路径和实际走向吻合度较高,由此看出路径模块的计算基本可靠。图 3(b)是“韦帕”台风路径计算和实际路径比较,可以看出,“韦帕”台风的计算路径和实际走向有一定误差,尤其是起始阶段,由于其初始阶段台风的移动速度预测过快,造成后面路径计算上的一定误差,但台风的走向和实际情况还是基本一致的。图 3(c)为近视角下“圣帕”台风的 3 维仿真场景,风场采用灰度和彩色两种显示模式。其中,红色表示高速区,蓝色表示低速区。图 3(d)为动态台风场景的近距离模拟截图。可以看到旗帜和树木在台风下做剧烈运动,其中部分竹子发生了折断,通过比较可以看出本文方法的模拟效果还是非常逼真的。

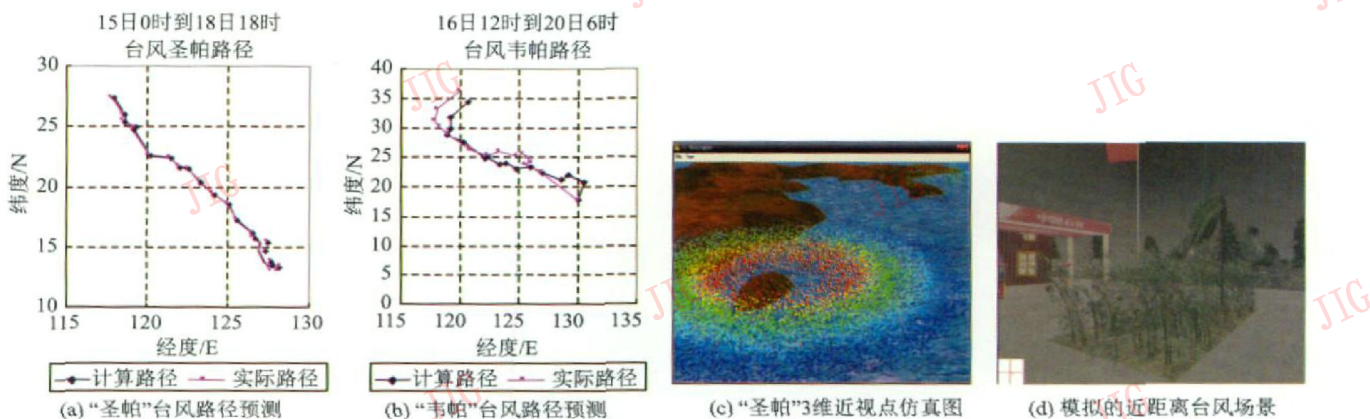


(a) 台风风场的可视化效果图

(b) 实测的台风风场示意图

图 2 台风风场的模拟

Fig. 2 The simulation of typhoon wind field



(a) “圣帕”台风路径预测

(b) “韦帕”台风路径预测

(c) “圣帕”3 维近视点仿真图

(d) 模拟的近距离台风场景

图 3 不同台风的模拟结果

Fig. 3 Simulation results of different typhoons

## 5 结 论

从台风的物理模型出发, 建立不对称 3 维台风风场, 利用实时卫星云图, 模拟出台风的移动路径; 并采用一系列真实感绘制技术, 首次逼真地绘制出台风下的动态场景。

未来的工作包括, 进一步完善台风与陆地的交互作用模型, 使模拟的风场更加准确; 并进一步模拟任意地理条件下台风预报, 台风变化演示等, 提供与真实台风数据的对比; 进一步绘制陆地和海洋场景, 包括台风时更逼真的巨浪场景, 模拟台风情况的灾难场景, 为灾难预防、防灾宣传作贡献。

### 参考文献 (References)

- [1] Thompson F, Cardone J. Practical modeling of hurricane surface wind fields [ J ] . Journal of Waterways Port Coastal & Ocean Engineering 1996, 122(4): 195-206.
- [2] Vickery P J, Twisdale L A. Wind-field and filling models for hurricane wind-speed predictions [ J ] . ASCE Journal of Structural Engineering 1995, 121(11): 1700-1709.
- [3] Vickery P J, Skerly P F, Steckley A C, et al. Hurricane wind field model for use in hurricane simulations [ J ] . Journal of Structural Engineering 2000, 126(10): 1203-1221.
- [4] Russel L R. Probability distribution for hurricane effects [ J ] . Journal of the Waterways Harbors and Coastal Engineering Division 1971, 97(1): 139-154.
- [5] Batts M E, Russel L R, Simiu E. Hurricane wind speeds in the United States [ J ] . Journal of the Structural Division 1980, 106(10): 2003-2005.
- [6] Tryggvason B V, Suny D, Davenport G. Prediction wind-induced response in hurricane zones [ J ] . Journal of the Structural Division 1976, 102(12): 2333-2350.
- [7] Georgiou P N, Davenport A G, Vickery B J. Design wind speed in region dominated by tropical cyclones [ J ] . Journal of Wind Engineering and Aerodynamics 1983, 13(3): 139-152.
- [8] Shapiro L J. The asymmetric boundary layer flow under a translating hurricane [ J ] . Journal of Atmospheric Sciences 1983, 40(8): 1984-1998.
- [9] Healey C G, Enns J T. Large datasets at a glance: Combining textures and colors in scientific visualization [ J ] . IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics 1999, 5(2): 145-167.
- [10] Mahalef V, Metaxas D, Sussman M. Animation and control of breaking waves [ C ] // Proceedings of ACM SIGGRAPH / Eurographics Symposium on Computer Animation Aire-la-Ville Switzerland Eurographics Association 2004 315-324.