

# 基于剖分的中尺度海洋温度场三维显示技术

刘文龙<sup>1,2</sup>, 胡兴树<sup>1,3</sup>, 季 民<sup>1,2</sup>, 王春晓<sup>1,3</sup>

(1. 海岛(礁)测绘技术国家测绘地理信息局重点实验室, 山东 青岛 266590; 2. 山东科技大学 测绘科学与工程学院, 山东 青岛 266590; 3. 国家测绘地理信息局第七地形测量队, 海南 海口 570203)

**摘要:** 针对网格化和数据量庞大的中尺度海洋标量场数据在其三维可视化中表现出来的构造效率较低和表达连续性效果较差的问题, 以剖分重构为核心思想, 采用三线性插值算法对数据进行加密处理, 基于不同角度平面对温度场进行剖分和色彩映射, 最后采用 OpenSceneGraph 图像渲染引擎的颜色、光照、透明度和回调等渲染技术展现更为真实的、科学的动态三维温度场, 提供一种简洁、高效、科学的中尺度海洋温度场表达方法。

**关键词:** 海洋温度场; 剖分重构技术; 重组; 渲染; 动态三维

中图分类号: TP391.9 文献标识码: A 文章编号: 1000-3096(2014)08-0094-05

doi: 10.11759/hyxx20121116004

海温是海洋物理性质中的最基本要素之一。海洋生产活动如渔场的变化、海水养殖等都需要了解海温的空间分布和变化规律。海温是环境动力的重要因素之一, 在一定程度上影响污染物迁移扩散速度和方向, 海温的研究对海洋溢油应急、水质、保护环境等有重要的参考价值。所以说掌握水温的分布变化规律对巩固国防、推动国民经济发展、环境保护有着重要的意义。但目前对于大面积深层海水体的温度场分布研究无论采用何种测量手段所取得的信息都是离散的, 其信息量也不足以形成对海洋温度场的连续表达。因此, 除采用传统的数值模拟方法外, 还需要采用更为科学、直观的方法来表现海洋温度场的分布情况。海洋温度场的三维数据场剖分重构技术为我们提供了这样一种有效的手段, 它利用离散的、数量较少的海水温度采样数据以三维的形式直观表现出海洋温度场的分布状况, 为进行海洋温度场相关的分析提供可靠的依据与直观的分析方法。

## 1 资料来源和预处理

NetCDF(Network Common Data Format)是一种网络通用数据格式, 由于其具有灵活性, 能够传输海量的阵列数据, 现在已经成为许多数据采集软件生成文件的格式, 被广泛用于陆地、海洋和大气科学<sup>[1]</sup>。海洋数据兼具时间性和空间性, 数据量庞大, 结构复杂, 所以 NetCDF 是理想的数据存储格式。本文采

用国家海洋环境预报中心提供的亚丁湾区域分层海洋数值模拟得到的 NetCDF 格式的海温数据, 空间分辨率为  $0.01^\circ$ (经纬度), 时间分辨率为 6 d, 所用资料均经过质量控制。

由于原始数据是矩阵的、离散的, 对于空间表达缺乏深层次的细节性描述, 因此不能直接用于展示三维场景, 必须经过插值预处理, 客观地、全面地恢复海洋温度场的真实形态, 形成可以灵活处理并能直接用于表达三维海温的详细的、规则的数据。

由于数据场是离散的三维海温矩阵数据, 因此我们采用针对三维空间的三线性插值算法对数据进行加密处理。首先将数据划分为  $M \times N \times H$  个基于经纬度和深度步距的立体子块, 每一个立体子块都是一个最小插值单元(特例: 在数据场中, 跨海岛、海山区域的温度属性被标记为“-9999”, 表示该区域无温度值。所以在构建立体子块的循环过程中, 若出现“-9999”值, 则舍弃改点, 不对该区域构建立方体, 也不对该区域进行插值处理)。

在每个立体块中, 如图 1 所示模型, 顶点  $A_1, A_2, A_3, A_4, A_5, A_6, A_7, A_8$  表示已知函数值的采样点,  $f(A_1), f(A_2), f(A_3), f(A_4), f(A_5), f(A_6), f(A_7), f(A_8)$  为对应的函数

收稿日期: 2012-11-16; 修回日期: 2014-05-14

基金项目: 海岛(礁)测绘技术国家测绘地理信息局重点实验室资助项目(2013B13); 高等学校博士学科点专项科研基金(20113718110001)

作者简介: 刘文龙(1987-), 男, 山东邹平人, 硕士研究生, 研究方向为地图学与地理信息系统, 电话: 18622960127, E-mail: liuwenlon1987@126.com

值。F 代表插值点,  $f(F)$  代表其函数值。根据 8 个相邻点的函数值计算插值点的函数值, 根据三线性插值原理, 要作  $x, y, z$  三个方向上的线性插值。

首先在  $y$  方向上做 4 次线性插值, 由  $A_1, A_2, A_3, A_4, A_5, A_6, A_7, A_8$  两两作 4 次线性插值分别得到  $K_1, K_2, K_3, K_4$  的值  $f(K_1), f(K_2), f(K_3), f(K_4)$ 。之后, 在  $z$  方向上作 2 次线性插值, 由  $K_1, K_2, K_3, K_4$  两两作 1 次线性插值分别得到  $W_1, W_2$  的值  $f(W_1), f(W_2)$ 。最后, 在  $x$  方向上做 1 次线性插值, 由  $W_1, W_2$  作线性插值得到  $F$  的值  $f(F)$ 。根据以上推导, 假设体元的顶点  $A_1$  在坐标原点, 则体元内任一点  $F$  的体数据值可用式(1)三元插值函数来估计, 即<sup>[2]</sup>:

$$f(F) = b_8xyz + b_7xy + b_6yz + b_5zx + b_4x + b_3y + b_2z + b_1 \quad (1)$$

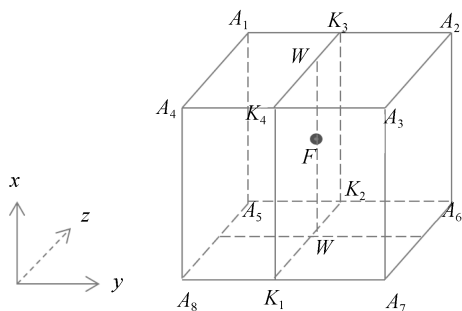


图 1 三线性插值模型

Fig. 1 Trilinear interpolation model

最后, 按一定的顺序遍历循环所有立体子块, 对每个立方体进行三线性插值, 直至结束, 最终得到相对平滑和密集的三维温度场数据。实验表明, 经过预处理之后的数据, 更有利于三维标量场的显示。

## 2 三维温度场的剖分和重组

### 2.1 剖分

目前常用三维标量场信息的表达形式有: 剖面重构法、三维等值面法和直接体绘制法<sup>[3]</sup>。对于其他两种方法, 剖面重构法能够一次性地表现截面或指定表面的全部海水水层信息, 而且计算量相对较少。鉴于此, 采用剖面重构法来处理亚丁湾海区数据。

剖分是根据需要选择一定的特征量或指定特定的准则来检测三维温度场中不同区域的一致性, 根据检测出来的区域一致性将数据场区别成不同区域, 从而可以更加方便地进一步分析和理解。通过剖分把研究人员感兴趣的目标对象(例如: 温度跃层、水团、等温水体等)从复杂的三维标量场提取出来以后,

就可以有针对性地对各个子区域进行定量分析。剖分过程如下(其中, 温度场的数据点空间位置作为温度场剖分的唯一空间参考依据, 温度值作为温度场剖分的唯一要素信息参考依据)。

(1) 建立平面切片。要实现在温度场上的分割, 必须建立多个平面切片, 然后在三维温度场进行分割, 如式:

$$M = N_1(x-x_0) + N_2(y-y_0) + N_3(z-z_0) \quad (2)$$

$(x_0, y_0, z_0)$  为分割点,  $(N_1, N_2, N_3)$  为  $M$  平面的法向量。

(2) 视线投射方向确定切割面位置。为了使观察者在任何角度观察场景都会有对应的切片存在, 从而消除由于视角变化导致的盲区, 设定垂直方向、经度方向、纬度方向、45°对角线和135°对角线5个固定视线投射方向, 对应5个方向的切割平面(图2)  $M = \{M_1, M_2, M_3, M_4, M_5\}$ 。切割平面在温度场中的位置如图2所示: 深色区域表示平面在温度场中的位置, 整个三维温度场用立方体来表示, 箭头为视线投射方向。

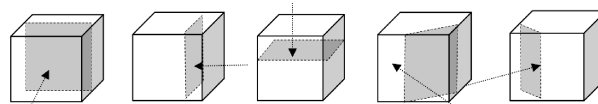


图 2 五个方向切割平面在温度场的位置

Fig. 2 The position of slices from five directions

(3) 对二维图片序列进行投射采样, 对采样点进行判断, 当采样点  $(x, y, z)$  的平面值  $M=0$ , 对这个采样点进行采样, 在采样过程中的每一个点判断其温度大小赋予不同颜色值。对于剖分的每一张切片都可以视为一张二维标量场, 而对于二维标量, 可以将标量映射到图像的彩色进行可视化。假定矢量大小  $S \geq 0$  在  $S_{\min} - S_{\max}$  变化, 进行变换如下变换使得  $S' [0, 255]$ 。

$$S' = (S - S_{\min}) / (S_{\max} - S_{\min}) \quad (3)$$

彩色模型是一个三维坐标系统, 标量映射到彩色不是很直接。简单的方法将标量等分为三段, 保持其他二维不变, 分别将每段映射到  $r, g, b$ , 于是有如下映射。

$$C(r, g, b) = \begin{cases} r = 3S', g = 0, b = 0, & 0 \leq S' \leq 1/3 \\ r = 0, g = 3(S' - 1/3), b = 0, & 1/3 < S' \leq 2/3 \\ r = 0, g = 0, b = 3(S' - 2/3), & 2/3 < S' \leq 1 \end{cases} \quad (4)$$

图 3 是线性变化的标量, 采用上述映射的结果, 可作为映射示意。



图3 标量映射  
Fig. 3 Scalarmapping

然后继续采样,直到所有屏幕上投射的光线的采样点采样结束为止。相反,则不对图像进行采样。

(4)对采样点进行图像合成。设定图片的格式统一,垂直剖分图片为 64 像素×64 像素,经纬度和对角线剖分图片为 128 像素×32 像素(图 4)<sup>[4-5]</sup>。

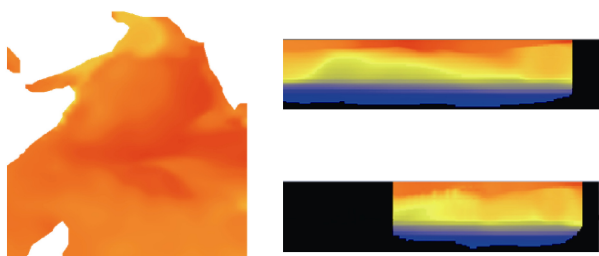


图4 剖分效果  
Fig. 4 Split effect

## 2.2 重组

### 2.2.1 几个基本概念

切片重组是解决三维重建的重要方法,在三维图像领域有非常广泛应用。三维海温重组是从一系列连续的二维图像序列中获取三维结构信息,通过提供三维结构信息为用户提供更接近真实海洋温度场的显示效果和针对具体海温现象的分析方法。本文借助切片重组方法构建了亚丁湾海区三维温度场模型。

OpenSceneGraph 是一个基于工业图形标准 OpenGL 的高层次图形开发 API 接口,一款开放源代码的、具备商业级别渲染能力的实时三维渲染引擎,在国内外均已得到广泛应用<sup>[7]</sup>。本文利用 OpenSceneGraph 三维渲染引擎实现了三维温度场的重建。

### 2.2.2 切片重组过程

(1) 获取研究区域的外包围盒。

(2) 在三维场景中,外包围盒内,按照图片序列等间隔构建垂直、经度、纬度、45°对角线和 135°对角线五个方向的矩形框。

(3) 对应方向上的图片以纹理形式贴入矩形框,并设置如光照、雾化效果。

### 2.2.3 网格剔除

切片相互交错会产生大量网格(图5),我们实现网格剔除的思路如下:首先实时计算视点与场景中

心点的角度,并找出与视线垂直的切片,然后隐藏其他方向的切片,始终保持只有一种方向切片存在于用户视线范围内。这样,无论观察者视线在哪个方向,都不会有网格存在。

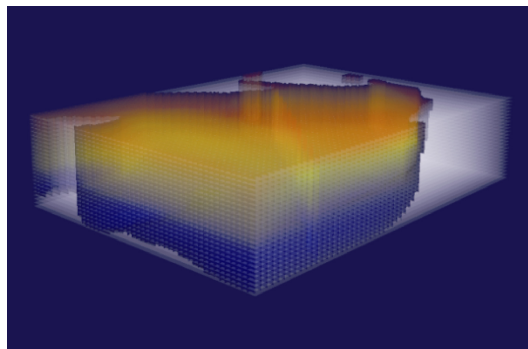


图5 切片重组效果  
Fig. 5 Restructure effect of slices

### 2.2.4 纹理动态更新

OSG 的渲染状态具有更新和事件的回调结构,用于在场景每一帧更新的过程中,或者人机交互事件时。回调可以用于完成各种场景的渲染状态动画效果,例如动画纹理、大雾消散、物体的渐显渐隐效果等。采用 OSG 中的函数回调技术按时间持续更新切片的纹理,形成动画效果,能够充分表达温度场随时间的变化过程,使温度场的变化规律和趋势一目了然<sup>[6]</sup>。

经过切片重组、网格剔除、纹理动态更新等渲染处理后的亚丁湾区域海洋温度场三维动态显示效果如图6所示(由于介质的限制,无法在此展现温度场随时间演变的动态效果)。从图中我们可以看到由于切片重组导致的网格已被消除,体现温度的色彩层次分明而且变化平滑无噪,同时,温度场的半透明效果使得海水效果更为逼真。

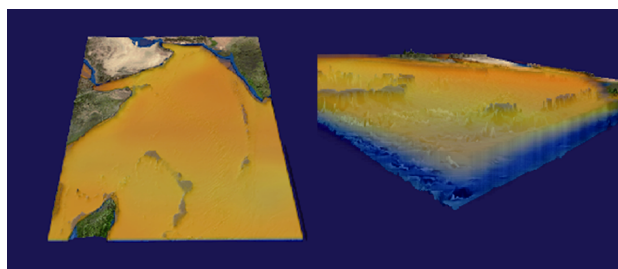


图6 渲染处理后效果  
Fig. 6 Rendering effect

## 2.3 基于切片重组的海温特征分析

基于“剖分-重组”思路扩展实现了等温水体和温

度跃层等海温特征的提取与表达。图 7 展示了采用“剖分-重组”方法实现等温水体和温跃层效果图。

温度是判断水团一个重要的指标,提取等温水体

对于研究水团具有非常重要的参考价值。遵循“剖分-重组”的思路,对初始数据过滤掉不在温度范围内的点并生成 png 格式二维图片,最后重构三维场景(图 7)。

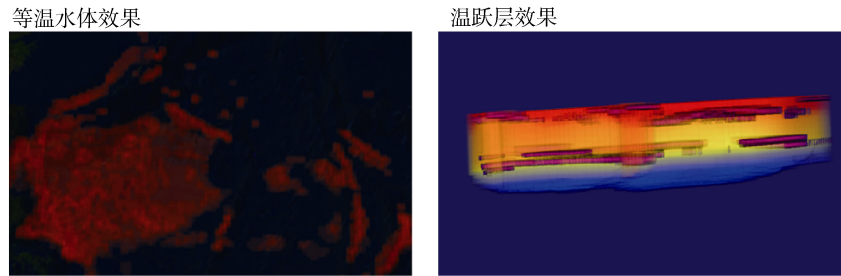


图 7 等温水体和温跃层效果

Fig. 7 Isothermal water masses and thermocline effect

温跃层是上层的暖水层与下层的冷水层间出现水温急剧下降的层,是生物以及海水环流的一个重要分界面,提取温跃层对于研究海洋现象有非常重要的意义。提取温跃层的方法有很多,在“剖分-重组”思路采用了垂向梯度法:自海面到海底将海水分为  $n$  层,各层的深度和水温标号为  $Z_1, Z_2, Z_3, \dots, Z_n$ ;  $T_1, T_2, T_3, \dots, T_n$ 。温跃层强度计算公式如下:

$$V=(\Delta T/\Delta Z)_{\max} \quad (5)$$

采用“从强选取”的原则,当一个温度剖面中某一段的垂直梯度大于临界值( $0.2^\circ\text{C}/\text{m}$ ,水深小于  $200\text{ m}$  时; $0.05^\circ\text{C}/\text{m}$ ,水深大于  $200\text{ m}$  时)时,确定该段为温度跃层,以该段的顶部水深为跃层上界<sup>[7]</sup>。基于这种思路把对应区域的温度跃层切片嵌入三维海温场景中(图 7)。

### 3 结语

介绍了在数据预处理的基础上对海洋三维温度场进行不同方向的剖分,利用 OpenSceneGraph 三维渲染引擎实现切片的重组和效果渲染的三维仿真技术,结论如下:(1)通过对三维温度场剖分重组方法展现的亚丁湾地区海洋温度场更为客观、真实和详细。(2)三维温度场剖分重组效率较高,计算机资源消耗低,只需一般硬件环境即可实现中尺度三维场景的动态表达。(3)在进行了特殊的光照处理和网格剔除后,实现了

海水体的半透明和雾化效果。(4)基于纹理的动态更新方法高效地表达了海水温度演变过程。(5)扩展了“剖分-重组”技术应用的范围,实现了等温水体和温度跃层等海温特征的三维动态表达。(6)存在问题:随着数据量的减少,基于剖分重组方法实现的三维由于切片之间缝隙增大,可视化效果会随之下降。

参考文献:

- [1] 孙建伟. NetCDF 格式数据的创建及应用[J]. 交通标准化, 2010, 266: 31-34.
- [2] 周敏. IDW 在医学断层图像可视化中的应用[J]. 计算机系统应用, 2009, 10: 160-161.
- [3] 冯建忠. 海水温盐流场三维动态可视化[D]. 青岛: 山东科技大学, 2011.
- [4] 卢艳平. 工业 CT 体数据切片重组方法研究[J]. 计算机工程与应用, 2007, 43(22): 201-203.
- [5] 甄政. 医学图像的二维边缘检测和三维剖分[D]. 成都: 电子科技大学, 2009.
- [6] 王锐, 钱学雷. OpenSceneGraph 三维渲染引擎设计与实践[M]. 北京: 清华大学出版社, 2009.
- [7] 葛人峰, 乔方利. 陆架海区温跃层特征量的一种计算方法——拟阶梯函数逼近法[J]. 海洋科学进展, 2003, 21(4): 393-400.

## Three-dimensional display of sea temperature in the meso-scale field based on the split reconstruction technique

LIU Wen-long<sup>1, 2</sup>, HU Xing-shu<sup>1, 3</sup>, JI Min<sup>1, 2</sup>, WANG Chun-xiao<sup>1, 3</sup>

(1. Key Laboratory of Surveying and Mapping Technology on Island and Reef, State Bureau of Surveying and Mapping, Qingdao 266590, China; 2. Geomatics College, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China; 3. The Seventh Institute for Topographic Surveying, National Administration of Surveying, Mapping and Geoinformation, Haikou 570203, China)

**Received:** Nov., 16, 2012

**Key words:** sea temperature field; split; reorganization; rendering; dynamic three-dimensional

**Abstract:** The three-dimensional display research on the mesoscale sea temperature field on construction efficiency and expression fluency should be strengthened due to the huge quantity and grid characteristics of the data. In order to provide a simple, efficient, scientific expression method for mesoscale sea temperature field, gulf of Aden area temperature field was split in different angle, and the two-dimensional sequence images were stick into slices as texture. Reconstructed three-dimensional temperature field model with color, light, transparency, callback and rendering technology, which reflect the real and scientific dynamic three-dimensional sea temperature field.

(本文编辑: 刘珊珊 李晓燕)