

7-15-2020

Modeling and Visualization On Scalar Fields of Meteorological Data

Shuoben Bi

School of Geographical Sciences, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China;

Yucheng Gong

School of Geographical Sciences, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China;

Mingyue Lu

School of Geographical Sciences, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China;

Zhou Hao

School of Geographical Sciences, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China;

See next page for additional authors

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the [Artificial Intelligence and Robotics Commons](#), [Computer Engineering Commons](#), [Numerical Analysis and Scientific Computing Commons](#), [Operations Research](#), [Systems Engineering and Industrial Engineering Commons](#), and the [Systems Science Commons](#)

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Modeling and Visualization On Scalar Fields of Meteorological Data

Abstract

Abstract: There are still many deficiencies in efficiency, interactivity, and accuracy in the visualization of meteorological scalar fields. Aiming at these problems, *a display method based on multi-level volume rendering technology is proposed, which processes the spatial field data to form a three-dimensional space grid. Through the dynamic mapping between the scalar values and the color values and transparency, the three-dimensional dynamic visualization effect of the meteorological scalar data is realized. Aiming at the interpolation method for the traditional MC (Marching Cubes) algorithm being not applicable to the meteorological data, and the connection method having ambiguity problem, the improvement method is proposed, which improves the deficiency of MC algorithm in the field of meteorological visualization.* Experiments show that the volume rendering can quickly and realistically simulate the dynamic changes of meteorological data, and the improved MC algorithm can make the results more accurate.

Keywords

visualization, scalar field, volume rendering, MC algorithm

Authors

Shuoben Bi, Yucheng Gong, Mingyue Lu, Zhou Hao, and Yuanxiang Mao

Recommended Citation

Bi Shuoben, Gong Yucheng, Lu Mingyue, Zhou Hao, Mao Yuanxiang. Modeling and Visualization On Scalar Fields of Meteorological Data[J]. Journal of System Simulation, 2020, 32(7): 1331-1340.

气象数据标量场的建模与可视化研究

毕硕本, 贡毓成, 路明月, 周浩, 毛远翔

(南京信息工程大学地理科学学院, 江苏 南京 210044)

摘要: 气象标量场的可视化仍有着许多效率、交互性和准确性上的欠缺。针对这些问题, 提出基于多层次体绘制技术的显示方法, 对空间场数据进行处理, 形成三维空间网格, 通过标量值与颜色值、透明度之间的动态映射, 实现气象标量数据的三维动态可视化效果。针对传统 MC(Marching Cubes) 算法存在的插值方法不适用于气象数据, 连接方式具有二义性的问题, 提出 MC 算法的改进方法, 完善了 MC 算法在气象可视化领域的不足。实验证明, 体绘制能够快速逼真地仿真出气象数据的动态变化效果, 改进后的 MC 算法则能使结果更加精确。

关键词: 可视化; 标量场; 体绘制; MC 算法

中图分类号: TP391.9

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X (2020) 07-1331-10

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.18-0702

Modeling and Visualization On Scalar Fields of Meteorological Data

Bi Shuoben, Gong Yucheng, Lu Mingyue, Zhou Hao, Mao Yuanxiang

(School of Geographical Sciences, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China)

Abstract: There are still many deficiencies in efficiency, interactivity, and accuracy in the visualization of meteorological scalar fields. Aiming at these problems, a display method based on multi-level volume rendering technology is proposed, which processes the spatial field data to form a three-dimensional space grid. Through the dynamic mapping between the scalar values and the color values and transparency, the three-dimensional dynamic visualization effect of the meteorological scalar data is realized. Aiming at the interpolation method for the traditional MC (Marching Cubes) algorithm being not applicable to the meteorological data, and the connection method having ambiguity problem, the improvement method is proposed, which improves the deficiency of MC algorithm in the field of meteorological visualization. Experiments show that the volume rendering can quickly and realistically simulate the dynamic changes of meteorological data, and the improved MC algorithm can make the results more accurate.

Keywords: visualization; scalar field; volume rendering; MC algorithm

引言

气象信息种类繁多, 数据规模庞大^[1], 往往难



收稿日期: 2018-10-22 修回日期: 2019-01-22;
基金项目: 国家自然科学基金(41971340, 41871285);
作者简介: 毕硕本(1965-), 男, 山东潍坊, 博士, 教授, 博导, 研究方向为空间数据挖掘和三维可视化; 贡毓成(1994-), 男, 江苏南京, 硕士生, 研究方向为三维可视化。

以直接从中发现规律。可视化技术能把人们无法直接观察的数据转变为易于接受的视觉信息, 并可对其模式、相互关系和内部结构等进行分析^[2]。将可视化技术应用于气象领域能帮助科学家研究气候、预测天气, 同时也有利于气象服务的推广与气象知识的传播^[3]。气象数据可划分为标量场与矢量场, 前者包括温度、湿度、气压、空气质量参数等要素,

<http://www.china-simulation.com>

• 1331 •

后者包括风场等要素, 本文研究气象标量场的建模与可视化。

气象标量场的可视化研究主要采用体绘制法和等值线/面的生成。体绘制法是一种促进视觉分析和模拟参与媒介的技术, 已广泛应用于学术界和工业, 如医学图像渲染^[4], 云模拟^[5]和地球科学数据可视化^[6]等。Yang 等^[7]直接从地理坐标系中创建了体纹理, 并提出了一种体光线投射方法来实现气象数据的可视化。Liang 等^[8]提出一种基于泰森多边形的球面包围盒构造方法以适应气象场数据的球面表达, 同时在可视化方法上对场数据进行三通道融合渲染, 取得了很好的可视化效果。DU 等^[9]在研究中国沿海碳通量随时间变迁的同时, 利用着色器语言和半角切片绘制方法改进体绘制的可视化效果。刘晓等^[10]提出了一种基于 7 方向 BOX 样条的改进型光线投射可视化算法, 使得梯度、法向、曲率的计算更加精确、可靠。秦绪佳等^[11]在传统光线投射算法分析的基础上进行改进, 提出基于球壳体的光线投射算法, 实现了台风强度随时间变更逐渐转弱的可视化演变过程。这些体绘制方法的实验结果质量较好, 能清晰地展示目标物的细节, 但由于每次移动视角时都需要重新计算, 因此效率与交互性得不到保障。

等值线/面反映了几何量值或物理量规律, 具有直观的特点, 因而在计算机可视化领域有着非常重要的地位^[12], 等值线/面的生成一般采用移动立方体算法(Marching cubes, 简称 MC)。MC 算法最早应用于医学上的表面重建工作^[13], 根据多幅医学图像序列重建出病灶组织的三维表面轮廓, 为医生提供直观的、全面的、准确的病灶组织和正常组织图像^[14]。后来, 随着探测技术的发展, MC 算法广泛地应用在水文地质、矿产矿物等需要观察三维细节的场景中。在气象数据场可视化中, 等值线、等值面的绘制也一直都是科研学者们研究的热点^[15]。尽管 MC 算法已经比较成熟, 但在连接方式上一直存在二义性问题, 且面对高密度数据时精度不佳。

针对上述问题, 本文提出了基于多层次体绘制技术的显示方法, 实现了气象标量数据的三维动态可视化效果; 同时解决了传统 MC 算法存在的插值方法不适用于气象数据、连接方式具有二义性等问题。本文的实验基于 VTK (Visualization Toolkit) 图形库来实现^[16]。

1 试验数据与数据预处理

1.1 数据简介

本文所使用的数据为 2017 年 10 月 7 日的我国中部地区 WRF (Weather Research and Forecasting Model, 简称 WRF) 所得 D01 网格的数据。通过预处理, 已经获取 23 层气压面的 69×91 的网格点的数据。其中, 气象条件数据有: 温度、风场、高度场、水汽场、降水、稳定性参数、涡度、散度及海平面气压。空气质量数据包括: 空气污染指数(AQI)、一氧化碳(CO)、二氧化硫(SO₂)、二氧化氮(NO₂)、臭氧(O₃)、颗粒物(PM10)及细颗粒物(PM2.5)等。

数据结构为 24 h 的 23 层数据, 以二进制文件保存, 单个数据占内存 4 字节, 存放的格点顺序是由西向东、由低纬到高纬。经度间隔为 0.272° , 纬度间隔为 0.235° 。

1.2 坐标转换

由于本文所用数据点的空间位置坐标是经纬度坐标, 故无法直接判读并在 VTK 中进行使用, 需要进行一定的转换操作。在模拟物体时, 常常根据物体的形状或属性特征进行坐标系的选取, 一般常用的坐标系有: 球体坐标系、空间坐标系、笛卡尔坐标系以及局部坐标系。地理坐标系之间的转换如图 1 所示。

在 VTK 可视化过程中, 主要有 4 种坐标系, 分别是: 模型坐标系、世界坐标系、视角坐标系和展示坐标系。模型坐标系统是定义模型形状状态时所采用的坐标系统, 以自身为坐标原点且通常是局部的笛卡尔坐标系。世界坐标系统是三维空间坐标

系, 用以来放入 VTK 中的 Actor 对象, 而 Actor 其中的一个功能就是负责将模型从模型坐标系统变换到世界坐标系统。每一个模型都可以有自己单独的模型坐标系统, 但在整个场景中, 世界坐标系只有一个, 每一个 Actor 对象必须通过放缩、旋转、平移等一系列操作将模型变换到世界坐标系中。相机和光照所在的坐标系也是世界坐标系。视角坐标系统则表示的是相机视野内的坐标系统。展示坐标系统跟视角坐标系统类似, 但是其坐标轴使用的为屏幕像素值。图 2 为 VTK 坐标系之间相互变换的示意图。

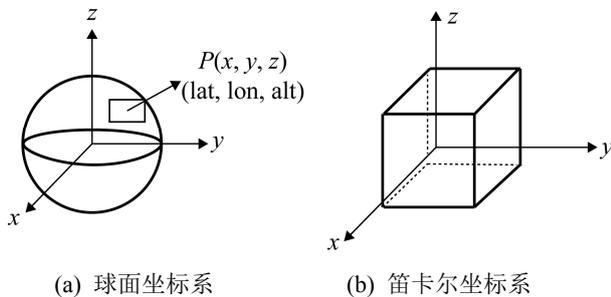


图 1 球面与笛卡尔坐标系

Fig. 1 Sphere and Cartesian coordinate system

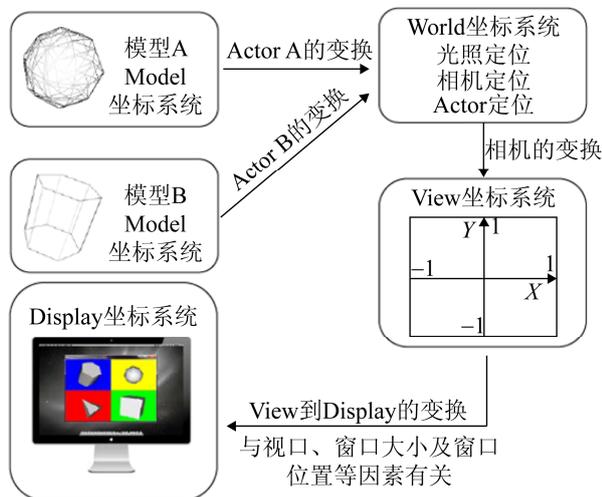


图 2 VTK 的坐标系变换示意图

Fig. 2 Coordinate system transformation of VTK

(1) 经纬度转换成 VTK 世界坐标。由于数据源中, 一层数据是 69×91 个格网点, 每一个格网点都有一个经纬度。故可通过以下公式将格网点数据转换:

$$\begin{cases} x = R \times \cos(\pi/180 \times LatValue) \times \sin(\pi/180 \times LongValue) \\ y = -1 \times R \times \cos(\pi/180 \times LatValue) \times \cos(\pi/180 \times LongValue) \\ z = R \times \sin(180 \times LatValue) \end{cases} \quad (1)$$

式中: R 为球形的半径; $LatValue$ 为纬度坐标; $LongValue$ 为经度坐标。

(2) VTK 世界坐标中不同高度层之间的坐标计算。在数据源中, 总共有 23 层数据, 其每一层的格网点经纬度都上下相同, 区别就在于每一层所属的气压层不同。通过下列公式, 可计算获得相同经纬度不同气压层的点的世界坐标。

$$l_h = \sqrt{((R+h) \times (R+h)) - Z_0 \times Z_0} \quad (2)$$

$$l = \sqrt{(R \times R - Z_0 \times Z_0)} \quad (3)$$

$$x = X_0 \times (1_h) / l \quad (4)$$

公式(2)~(4)中: R 为地球的设定半径; h 为所求点距地表的高度值; Z_0 为初始点的世界坐标系的 z 值; X_0 为初始点的世界坐标系的 x 值。联立式(2)~(4), 可计算出所求点的世界坐标系的 x 值。

同理, 所求点的世界坐标系中的 y 值公式为:

$$l_h = \sqrt{((R+h) \times (R+h)) - Z_0 \times Z_0} \quad (5)$$

$$l = \sqrt{(R \times R - Z_0 \times Z_0)} \quad (6)$$

$$y = Y_0 \times (1_h) / l \quad (7)$$

所求点的世界坐标系中的 z 值公式为:

$$l_h = \sqrt{((R+h) \times (R+h)) - Z_0 \times Z_0} \quad (8)$$

$$l = \sqrt{(R \times R - Z_0 \times Z_0)} \quad (9)$$

$$z = Z_0 + (Z_0 \times h) / R \quad (10)$$

通过公式(2)~(10), 可求得本文所示空间范围内的任意经纬度, 任意距地表高度的点的世界三维坐标。

2 基于多层次体绘制技术的气象数据动态显示

2.1 体绘制技术流程简介

体绘制技术通常描述为根据三维体数据场产生二维图像 (技术流程见图 3), 更具体的描述则

是通过一定的方法,依据物体的三维空间信息,依次展示物体的体细节而非表面细节。该技术的核心思路是为针对每一个空间体素指定一个对应的不透明度,再设定一个光照源,发射光线穿过整个数据场,并根据体素的不透明度考虑每一个空间体素对光线的透射、发射和反射作用。最终依据每个像素点所穿透的所有体素光线返回值进行彩色合成,形成一个像素点的颜色值。

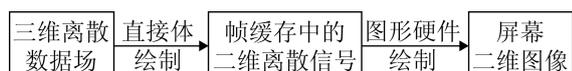


图 3 直接体绘制法流程图

Fig. 3 Flow chart of direct volume rendering

在体绘制技术中,抛雪球算法、光线投射算法和错切-变形算法等是当前比较常用的直接体绘制算法^[17],其中光线投射算法和抛雪球法能够形成高质量的空间图形效果,但是重绘效率太低,不满足本文实时动态性的要求,而错切-变形方法则十分容易损失精度^[18-20]。

2.2 空间立方体多层次颜色动态映射

对于传统的体绘制技术而言,虽从绘制结果来讲,图像质量较好,可清晰地观察物体内部结构,对于细节也可有详细的展示,但是对硬件的要求很高,运行速度比较慢^[21]。当数据体量较大时,若从不同方向进行观察,即移动相机视角时,每一帧都需要重新绘制,而这每一帧都是巨大的计算量。很显然,这种方法是效率低下的,同时实时性与交互性也得不到保障。

在气象模式中,输出的模式结果多为大体量数据,故传统的绘制方法已不能满足要求。基于此,本文使用 VTK 中的 UnStructGrid 类,通过组织空间网格点的排列顺序,在空间中排列立方体网格。利用预先设定好的坐标转换函数,计算得出 23 层每一层的格网点所处的 VTK 世界坐标系中的坐标信息。同时,将所需要展示的属性值信息,对应赋予每一个网格点。接着利用 VTK 中的基础图元

Hexahedron, 绘制出 23 层网格。做一颜色映射表 (R, G, B, A), 根据气象要素的本身特性,对当前要素的属性值进行多层次分级。当属性值相对较低时,按照该气象要素划分等级要求,设定属性值变化域,并将所有属于该域的空间网格的透明度设为低值,赋予冷色调颜色。当属性值相对较高时,设定属性值变化域,设定透明度较高,并赋予暖色调颜色,从而模拟出整个空间标量场。

该方法的具体步骤如下:

step 1: 读入数据,计算得到所有网格点的世界坐标,并对每个网格点赋予对应的属性信息。

step 2: 组织排列好数据格式,放入基础图形单元 Hexahedron 所形成的 UnstructGrid 对象中。

step 3: 根据所绘制要素的分级条件,针对不同属性值域,设置不同的透明度和冷色调,建立颜色分级映射表。

step 4: 利用 VTK 进行三维空间场的绘制。

该方法的流程图如图 4 所示。

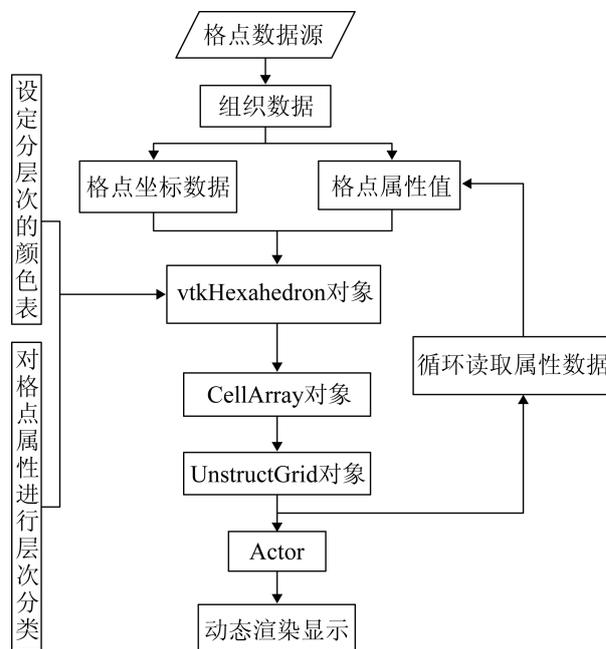


图 4 立方体动态映射方法流程图

Fig. 4 Flow chart of cube dynamic mapping method

当整个空间场网格建好后,所有点的位置信息都是固定的,而属性信息则根据不同时间段,产生

变化。故编写 ProgrammeFilter 程序, 通过读取相对应的属性值文件, 更新网格点的属性值, 以此来更新颜色值与透明度。由于数据场中, 所有网格点的位置信息在初始化过程中就已经确定, 所以在后期动态变化演示无需计算更新位置信息, 只需更新属性值即可。同时, 设定一个过滤器, 在检索空间立方体 8 个顶点标量值时, 筛选所有 8 个点为零的情况, 并跳过该立方体的绘制步骤, 减轻计算量及绘制时间。最终, 设定场景刷新时间间隔, 来给予读取属性数据的缓冲时间, 以此来完成动态绘制效果。

通过编码, 将数据源中的第 0 层与第 1 层格网节点信息编码排列进该数据结构对象中, 按照空间立方体 12 个点的 ID 顺序, 从事先处理好的数组中, 抽取相对应的点, 进行排列。vtkHexahedron 对象的具体组织格式如图 5 所示。

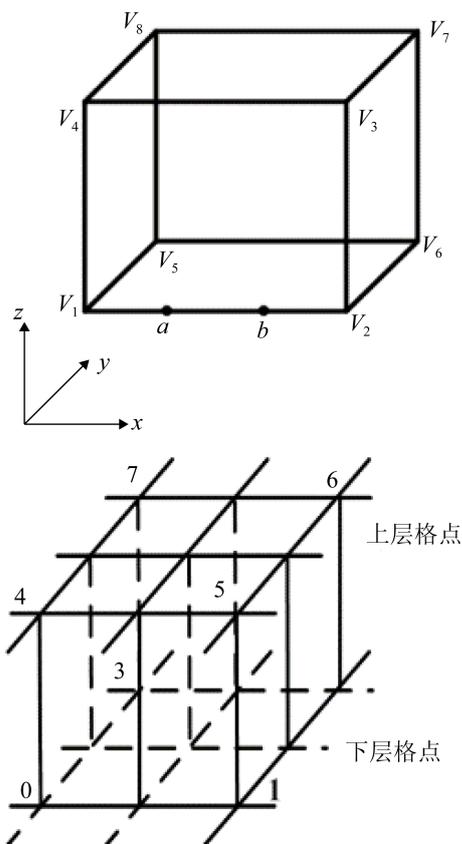


图 5 vtkHexahedron 对象的具体组织格式

Fig. 5 Specific organization format of vtkhexahedron object

将组织好的数据点放入 UnstructGrid 类对象中, 再放入 Actor 中, 利用 GPU 进行绘制。

2.3 实验结果与分析

图 6 是按上述方法绘制的气象条件中六个气象要素的零时体绘制结果。

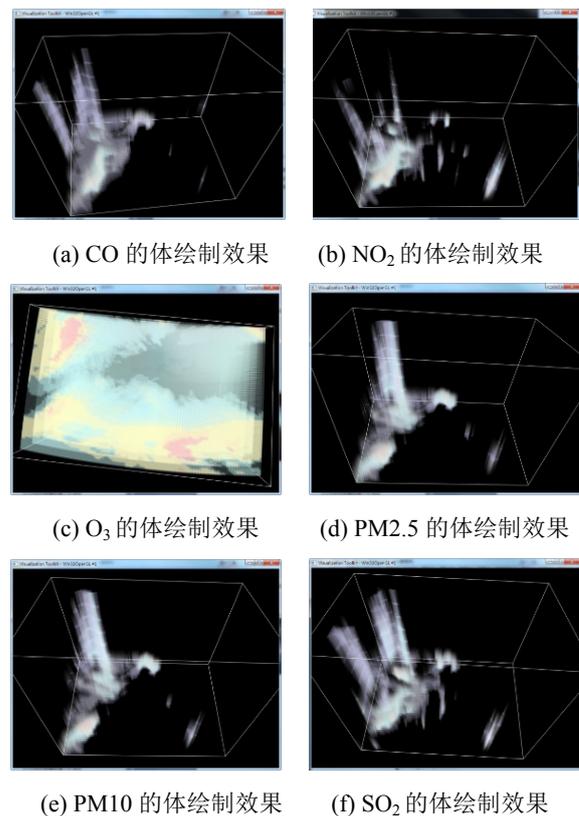


图 6 不同要素的体绘制效果图

Fig. 6 Volume rendering renderings of different elements

图 7 选取了 CO 要素作动态效果演示, 分别是 0 时刻, 10 时刻与 17 时刻的浮动变化情况(均为北京时间)。

从图 7 不同时刻的 CO 动态变化图可看出, 在 0 点时刻, 空间场范围内, 整体的 CO 浓度是偏低的, 只有偏左部分贴近地表的中心区域值较高, 随着时间变化, 到了 10 点时刻, 整个区域的 CO 浓度开始扩张, 可明显看到在垂直高度上有浓度值的拉伸分布, 且高浓度区域也开始变的明亮, 这是设定了分级渲染的缘故。到了晚上 17 时刻, 整个空间场范围内的 CO 浓度值达到最高, 可明

显看到有的地方在距地表一定高度的地方也出现了 CO 的分布。

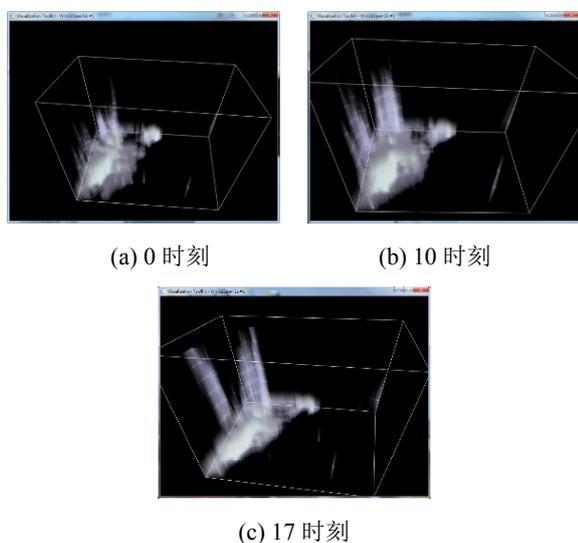


图 7 CO 动态演示效果图

Fig. 7 CO dynamic demonstration renderings

3 基于改进 MC 算法的气象要素等值面绘制

MC 算法一直是经典的求取等值面算法，其核心思路是判断等值面是否穿过体元，并利用插值方法计算出等值面与所穿体元棱柱的交点位置，根据所有交点的位置信息绘制三角面，最终展现等值面信息。但用该方法处理气象数据时，仍存在以下 2 个问题：

(1) MC 方法构造的三角面片是等值面的近似

在 MC 算法的描述中，等值面与所交体元的交点，是按照体元棱柱的反距离线性插值得到的，这在数据场密度非常高，体元非常小的情况下适用，所求等值面可近似真实的等值面情况，例如 CT (Computed Tomography) 或 MRI (Magnetic Resonance Imaging) 所得的医学图像。但在气象数据场上，则不适合。因为气象数据的真实空间范围都是非常庞大，在模型中看似密集的数据场，相对而言都属于稀疏数据场的范畴，其体元都是较大，这时认为函数值在体元棱柱上的交点信息仍是线性变化，则会产生较大误差。

(2) 连接方式上的二义性

在原始的 MC 算法中，一个体元，其中一个面，存在一个角点的值大于等值面的值而相同棱柱上的另一个角点的值却小于等值面的值时，则会出现两种不同的连接方式，因此存在连接二义性^[2]，如图 8 所示。

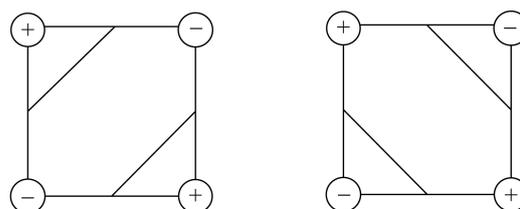


图 8 连接方式二义性

Fig. 8 Connection ambiguity

针对以上 2 个主要问题，相对于气象要素数据而言，本文采用相对应的 2 个方法，解决 MC 算法在绘制气象要素等值面时的不足。

3.1 优化插值方法

在气象预警预报模式中，对于气象要素插值方式的研究，越来越精细精准化。然而在科学计算可视化领域，过于复杂的插值方式会消耗过多的计算资源，在计算结果满足要求的情况下，微量的精度提升反而不能平衡其利用的计算负担。故仅针对气象要素数据的可视化而言，优化气象数据场中的垂直方向上的插值方式，而在水平方向上依旧选择反距离加权插值方式，是提升 MC 算法精度的较为理想的方式。

对于 MC 插值方式的研究有很多，例如中点法^[22]，中位数法^[23]，三等分点法^[24]，协同克里格插值方法^[25]、黄金分割点法^[26]等。这些方法在相对应的某些领域确实可以提升一定的精度，但在气象数据可视化上，仍显不足。

相较于水平方向上的距离范围，垂直高度的距离范围是较小的。如果按照真实的空间距离进行可视化，则可视化的效果不明显。同时，在大气层的垂直方向上，气压并不是等距离分布的。其遵循着一定的规则，再根据距离进行插值点求解

就显得不精确。故选择气压或者气压的对数作为插值条件, 水平方向仍以距离作为插值条件, 更符合实际情况。

压高方程:

$$\int_{p_1}^{p_2} dp = -\int_{z_1}^{z_2} \rho g dz \quad (11)$$

式中: z_1, z_2 为不同高度; p_1, p_2 为对应高度的气压; ρ 为空气密度; g 为重力加速度, 下同。

在同等条件下, 假设某气象要素在单位质量的大气中的密度是相同的, 则气压越大的地方, 该气象要素的密度越大, 两者成正相关关系。关系如下:

标量值与气压关系方程:

$$\frac{v_1 - v_0}{v_2 - v_0} = \frac{p_1 - p_0}{p_2 - p_0} \quad (12)$$

式中: v_1, v_2 为不同高度位置的标量值; p_1, p_2 为对应高度的气压。

关联压高方程式(11), 由此可得该气象要素的某一属性值所处的高度位置满足以下方程:

$$\int_{v_1}^{v_2} dv = -\int_{z_1}^{z_2} \rho g dz \quad (13)$$

式中: v_1, v_2 分别为等值面所在棱柱角点的标量值和等值面的标量值; z_1, z_2 分别为等值面所在棱柱角点的高度和等值面的高度。

通过公式(13), 在垂直方向上, 求得等值面交点的空间高度坐标, 在水平方向上仍采用距离插值, 进行 MC 算法的交点计算。

3.2 用渐近线法判别和消除二义性

针对 MC 算法中存在的二义性问题, 学者们提出了很多的方法^[27], 包括插值交点判定^[28]、四面体法^[29]来解决, 但是最常用的为渐近线法。

在三维等值面求解过程中, 等值面与体元边界的交线在一般情况下往往是一对双曲线。渐近线法的核心思想就是: 求解这对双曲线的两条渐近线, 根据渐近线的交点状态来判别二义性立方体使用哪种方式进行连接。如图 9 所示, 双曲线与体元的一个边界面的相互位置共有 4 种情况, 其中只有第一种情况存在二义性连接问题,

也就是说, 此时边界面已经被一分为三, 双曲线的两条渐近线交点必然与体元上边界面的对角线的一对顶点处于同一区域内。这就可以用阈值判断来进行连接方式的选择。

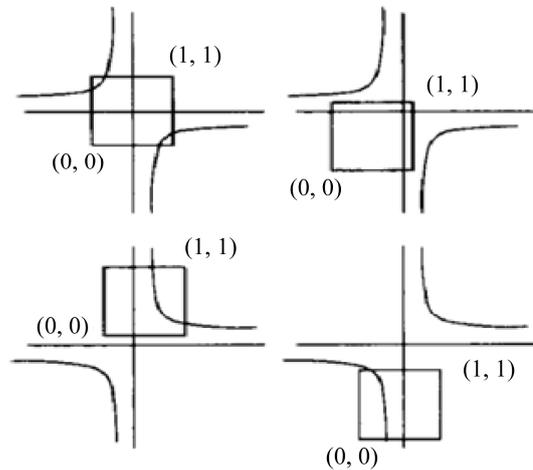


图 9 双曲线与体元边界面的相互位置关系
Fig. 9 Relationship between the position of hyperbola and the boundary of volume element

设定体元的边界面的 4 个顶点为 A, B, C, D 。等值面与体元棱柱的交点为 M_1, M_2, M_3, M_4 , 其中 A, C 状态相同, 为“负”, 另外两个相反, 为“正”, 根据计算方法得到渐近线交点的状态, 如果状态为“正”, 则按图 10(a)方法连接, 相反, 则按图 10(b)连接。通常将(a)称为正值二义面, 将(b)称为负值二义面。

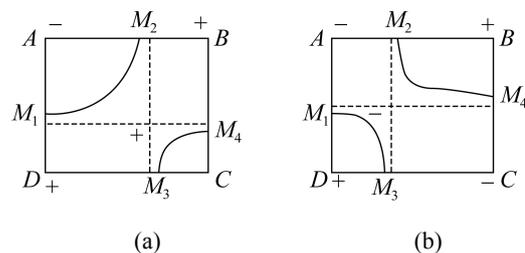
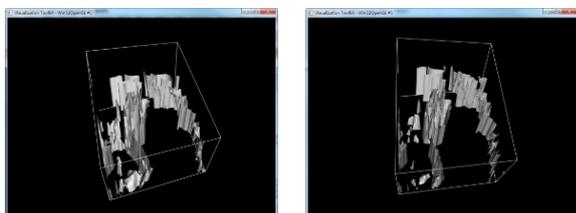


图 10 二义性出现时, 交点之间的连接准则
Fig. 10 Connecting criterion between intersections when ambiguity occurs

3.3 实验结果对比与分析

选用 PM2.5、温度作为分析数据源, 分别用原始 MC 算法, 和改进后的 MC 算法进行空间等值

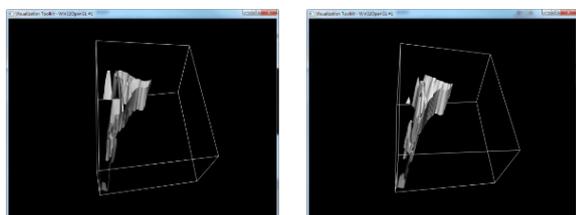
面绘制,同时记录所求等值面中的三角面片数量以及所用的时间,来分析对比两种方法性能上的优劣。这二种方法的可视化结果见图 11~12。



(a) 原始 MC 算法 (b)改进 MC 算法

图 11 两种方法绘制的 O₃ 为 50 mg 等值面

Fig. 11 Isosurface with O₃ of 50 mg drawn by two methods



(a) 原始 MC 算法 (b)改进 MC 算法

图 12 两种方法绘制的温度为 10 °C 的等值面

Fig12. Isosurface with temperature of 10 °C drawn by two methods

由于插值方法的改进,同时加入了渐近线判别二义性方法,在计算效率上而言,改进后的 MC 算法比原始的 MC 算法效率上肯定是低的。虽然改进的 MC 算法增加了计算量,但为了得出完全正确的结果却是十分必要的。随着计算机硬件的发展,增加的计算量也会显得越来越无足轻重。表 1 为原始 MC 方法与改进后的 MC 方法在模拟温度、PM2.5、CO 时所用的时间、三角面片数量对比情况。

表 1 MC 算法优化前后实验结果比较

Tab. 1 Comparison of experimental results before and after MC algorithm optimization

实验数据	等值面数值	采用方法	三角面片数/个	生成时间/ms
温度	25 °C	原始 MC	23 789	2 802
		改进 MC	26 523	3 218
PM2.5	100 µg/m ³	原始 MC	16 238	1 984
		改进 MC	19 526	2 890
CO	1.8 mg/m ³	原始 MC	9 404	1 035
		改进 MC	10 241	2 015

4 结论

本文通过解析空间标量场数据,利用空间体绘制技术,绘制出了典型气象要素的空间分布变化效果。根据不同气象要素的分级规则,将所有数据的值域进行分层次,赋予不同的颜色和透明度,以此来进行某些属性值段的加强显示。再设定刷新时间,循环读取数据,实现场数据的动态映射效果。

同时,根据气象学上的高度与气象要素之间的关系,建立关联方程,通过方程的插值计算来确定等值面交点的高度位置信息,解决了线性插值不适合气象数据在高度场上的问题。并针对 MC 算法中存在的二义性问题,利用渐近线判别法对其进行了修正,使得结果更加精确。

当然该方法也存在着缺陷,针对特定的气象要素时可用该插值方式,但当求取例如水汽、水汽压等要素时,需要根据相关知识进行更加具体的插值方程的求解。此外在效率上也稍低于原始的 MC 方法,对这些问题的解决将是下一步研究的方向。

参考文献:

- [1] 梅鸿辉, 陈海东, 肇昕, 等. 一种全球尺度三维大气数据可视化系统[J]. 软件学报, 2016, 27(5): 1140-1150.
Mei Honghui, Chen Haidong, Zhao Xin, et al. Visualization System of 3D Global Scale Meteorological Data[J]. Journal of Software, 2016, 27(5): 1140-1150.
- [2] Tang Z S. Visualization of Three-dimensional Data Field[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1999: 1-8.
- [3] 白雪莹. 气象数据可视化表达研究与分析[J]. 科技传播, 2017, 9(12): 58-59, 61.
Bai Xueying. Research and analysis of visual expression of meteorological data[J]. Science and technology communication, 2017, 9(12): 58-59, 61.
- [4] Zhang Q, Eagleson R, Peters T M. Volume visualization: a technical overview with a focus on medical applications[J]. Journal of Digital Imaging (S0897-1889), 2011, 24(4): 640-664.
- [5] Oskar E, Tobias R, Alexander W. Interactive cloud rendering using temporally coherent photon mapping [J]. Computers & Graphics (S0097-8493), 2012, 36(8): 1109-1118.
- [6] Patel D, Bruckner S, Viola I. Seismic volume

- visualization for horizon extraction[C]. In: IEEE Pacific Visualization Symposium (PacificVis). Taipei, Taiwan: IEEE, 2010: 73-80.
- [7] Yang C, Wu L D. GPU-based volume rendering for 3D electromagnetic environment on virtual globe[J]. International Journal Image of Graphics & Signal Processing (S2074-9074), 2010, 2(1): 53-60.
- [8] Liang J M, Gong J H, Li W H, et al. Visualizing 3D Atmospheric Data with Spherical Volume Texture on Virtual Globes[J]. Computers & Geosciences (S0098-3004), 2014, 68: 81-91.
- [9] Du Z H, Fang L, Bai Y, et al. Spatio-temporal Visualization of Air-sea CO₂ Flux and Carbon Budget Using Volume Rendering[J]. Computers & Geosciences (S0098-3004), 2015, 77: 77-86.
- [10] 刘晓. 基于光线投射技术的三维体数据场可视化[D]. 杭州: 杭州电子科技大学, 2015.
Liu Xiao. Three-dimensional data field visualization based on the ray casting technology[D]. Hangzhou: Hangzhou Dianzi University, 2015.
- [11] 秦绪佳, 张勤锋, 陈坚, 等. GPU 加速的台风可视化方法[J]. 中国图象图形学报, 2012, 17(2): 293-300.
Qin Xujia, Zhang Qinfeng, Chen Jian, et al. GPU accelerated typhoon visualization method[J]. Journal of Image and Graphics[J], 2012, 17(2): 293-300.
- [12] 成诗明, 杨光. 基于 OpenGL 的三维等值线绘制实现[J]. 科技创新导报, 2008(6): 22-23.
Cheng Shiming, Yang Guang. Realization of 3D isoline drawing based on OpenGL[J]. Science and Technology Innovation Herald, 2008(6): 22-23.
- [13] 朱恺. 基于改进 MC 算法的脑图谱三维可视化应用研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2015.
Zhu Kai. The research on visualization of 3D brain atlas base on improved MC algorithm[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2015.
- [14] 许婉露, 李彬, 田联房. 基于 MC 算法的高质量脊柱 CT 图像三维重建[J]. 计算机应用与软件, 2013, 30(6): 79-82.
Xu Wanlu, Li Bin, Tian Lianfang. High-quality 3D reconstruction of spine CT images based on MC algorithm[J]. Computer Applications and Software, 2013, 30(6): 79-82.
- [15] 张湘菊. 基于 GPU 的 MC 加速算法[J]. 南方医科大学学报, 2008, 28(9): 1721-1724.
Zhang Xiangju. MC acceleration algorithm based on GPU[J]. Journal of Southern Medical University, 2008, 28(9): 1721-1724.
- [16] 顾耀林, 袁江琛. 空间相关 MC 算法的 VTK 实现[J]. 计算机工程与设计, 2007, 28(13): 3160-3162.
Gu Yaolin, Yuan Jiangchen. Marching cubes algorithm based on space correlation using VTK[J]. Computer Engineering and Design, 2007, 28(13): 3160-3162.
- [17] 徐赛花. 基于 CUDA 的光线投射体绘制方法研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2011.
Xu Saihua. Research on rendering method of ray casting volume based on CUDA[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2011.
- [18] Dachille F, Kreeger K, Chen B Q, et al. High-quality volume rendering using texture mapping hardware[C]. In ACM SIGGRAPH/EUROGRAPHICS Workshop on Graphics Hardware. Lisbon, Portugal: The Eurographics Association, 1998: 69-76.
- [19] Horbelt S, Vetterli M, Unser M. High-Quality Wavelet Splatting for Volume Rendering[C]. In Wavelet and Application Workshop. Switzerland: Monte Verita, Ticino, 1998: 1-1.
- [20] Bergner S, Möller T, Drew M S, et al. Interactive Spectral Volume Rendering[C]. In Visualization. Boston, MA, USA: IEEE Visualization, 2002: 101-108.
- [21] Victoria I, Chester G. Strategies for Effectively Visualizing a 3D Flow Using Volume Line Integral Convolution[M]. Hampton, VA, USA: Institute for Computer Applications in Science and Engineering, 1997.
- [22] Nielson G M, Hamann B. The asymptotic decider: resolving the ambiguity in marching cubes [C]. San Diego, CA, USA: IEEE Conference on Visualization, 1991: 83-91.
- [23] 张尤赛, 陈福民. 三维医学图像的体绘制技术综述[J]. 计算机工程与应用, 2002, 38(8): 18-19.
Zhang Yousai, Chen Saimin. Volume rendering of 3D medical volumetric data[J]. Computer Engineering and Applications, 2002, 38(8): 18-19.
- [24] 毕硕本, 陆源, 曾晓文, 等. Marching Cubes 改进算法及其气象三维模拟[J]. 系统仿真学报, 2017, 29(7): 1405-1410.
Bi Shuoben, Lu Yuan, Zeng Xiaowen, et al. Improved Marching Cubes Algorithm and Its Three-dimensional Meteorological Simulation[J]. Journal of System Simulation, 2017, 29(7): 1405-1410.
- [25] 朱经纬. 三维数据场的三维重建与模型的虚拟切割研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2007.
Zhu Jingwei. Research of 3D reconstruction for 3D data set and virtual cutting for model[D]. Wuhan: Huazhong

- University of Science and Technology, 2007.
- [26] 帅仁俊, 陈书晶. 一种改进的 MC 三维重建算法[J]. 中国数字医学, 2016, 11(3): 83-86.
Shuai Renjun, Chen Shujing. An Improved MC Three-Dimensional Reconstruction Algorithm[J]. China Digital Medicine, 2016, 11(3): 83-86.
- [27] Kim S K, Ohtake Y, Nagai Y, et al. A novel interpolation scheme for dual marching cubes on octree volume fraction data[J]. Computers & Graphics (S0097-8493), 2017, 66: 169-178.
- [28] 王铮, 李瑞明. 移动立方体算法面二义性问题研究[J]. 软件工程, 2017, 20(9): 6-8.
Wang Zheng, Li Ruiming. Research on Ambiguous Cases of Marching Cubes Algorithm[J]. Software Engineering, 2017, 20(9): 6-8.
- [29] 吴晓莉. 医学图像可视化移动立方体算法二义性研究[D]. 成都: 四川师范大学, 2013.
Wu Xiaoli. The research on the ambiguity of marching cubes in medical image visualization[D]. Chengdu: Sichuan Normal University, 2013.