

时变体数据传输函数设计及其在行星际数值模拟结果可视化中的应用*

祝 艳^{1,2} 钟鼎坤¹

1(中国科学院国家空间科学中心 北京 100190)

2(中国科学院大学 北京 100049)

摘 要 为便于太阳风暴行星际传播数值模型结果可视化分析,提出一种针对时变模拟数据体绘制的传输函数设计算法(Transfer Function for Time-varying Volume data, TFTV)。该算法首先基于KNN(K-Nearest Neighbors, KNN)背景差分法提取运动区域;然后,利用频率调谐(Frequency Tuned, FT)显著性算法检测日冕物质抛射(Coronal Mass Ejection, CME),并设计颜色反映射算法查找CME与背景的分界阈值;最后,基于阈值自适应调整传输函数实现各时间步上运动区域中CME的快速三维可视化。实验结果表明,该算法能够适应静态及动态背景下CME的数值模型结果,相对于线性传输函数有效避免了视线方向的遮挡,直观自动地展示了相对动量的变化,示踪行星际空间中CME的演化过程,局部区域的提取降低了数据冗余,借助算法自动分析数据自适应调整传输函数避免了人工调整的低效性。

关键词 体绘制,传输函数,可视化,数值模拟

中图分类号 P35, TP391.41

A Time-varying Volume Data Transfer Function for Interplanetary Numerical Simulation Data

ZHU Yan^{1,2} ZHONG Dingkun¹

1(National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190)

2(University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

Abstract Understanding the interplanetary propagation of solar storms is the foundation of space environmental forecasting and services. The visualization of numerical model simulation data is an important method to analyze the propagation dynamics process and verify the validity of the model. In order to facilitate the visualization analysis of the numerical model simulation data with increasing simulation

* 国家自然科学基金项目资助(41874202, 42030204)

2022-01-08 收到原稿, 2022-12-18 收到修定稿

E-mail: dkzhong@spaceweather.ac.cn

©The Author(s) 2023. This is an open access article under the CC-BY 4.0 License
(<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

scale, a Transfer Function for Time-varying Volume data rendering (TFTV) based on the characteristics of time domain and frequency domain is proposed. The algorithm is designed to extract images including motion regions based on the K-Nearest Neighbor (KNN) background subtraction method, and then the three-dimensional subset of the moving region can be extracted according to the mapping relationship between the image and the volume data to achieve the reduction of large-scale grid volume data. Then the Frequency Tuned (FT) salient region detection algorithm is used to detect Coronal Mass Ejection (CME) in motion area images, and according to the CME detection results, a color inverse mapping algorithm is designed to find the boundary threshold between the CME and interplanetary space background. Finally, the transfer function design in volume visualization is adaptively adjusted based on the threshold to realize the fast 3D visualization of CME in the motion region at each time step. The experimental results show that TFTV transfer function algorithm can adapt to the numerical model simulation data in static and dynamic backgrounds. Compared with the linear transfer function, the occlusion of the line in sight direction is effectively avoided, the change of relative momentum is intuitively and automatically displayed, and the evolution process of CME in interplanetary space is traced. The extraction of local regions reduces data redundancy, and the process of adaptively adjusting the transfer function by automatically analyzing the data with the help of algorithms avoids the inefficiency of manual adjustment.

Key words Volume rendering, Transfer function, Visualization, Numerical simulation

0 引言

了解太阳风暴行星际传播过程是空间环境预报和服务的基础,数值模型结果可视化是分析传播动力学过程及验证模型有效性的重要方法,体绘制算法能够直观地展示三维数据整体及内部的特征信息,是刻画大规模科学数据中复杂物理特征的有效途径。基于传输函数和光线投射算法的体绘制技术在空间环境中有很多成功实践。Mikić等^[1]利用体绘制算法可视化日冕区域数值模拟结果中磁通量管挤压因子 Q ,以强调太阳磁场的内在复杂性及其与太阳日冕可见光的密切联系;Bock等^[2]使用体绘制技术分析检查数值模拟结果中CME的三维结构;Carlbaum等^[3]基于ENLIL模型^[4]模拟结果集成场线、日冕及体绘制结果,以直观地表现日地事件。

体绘制的关键在于传输函数的设计。20世纪90年代以来,不断推出新的传输函数方法简化体绘制传输函数设计过程,以提高三维标量场数据可视化方法的有效性和实用性^[5]。建立传输函数映射规则的过程本质上是对数据进行分类,目前传输函数的自动设计方案主要有3类:(1)对统计空间进行聚类分析并

基于聚类结果自动调整传输函数^[6-8];(2)针对时变体数据特征使用核密度估计、高斯混合等概率估计模型并基于概率自动调整传输函数^[9-12];(3)通过交互式方式勾画感兴趣特征线及背景特征线,根据两者差异增大感兴趣标量范围不透明度设计的自动传输函数^[13]。然而随着体数据网格规模的增加,数据量呈指数增长,逐个计算、比较概率的计算量巨大,且统计空间维数的增加会使相似度量及距离计算逐渐产生偏差,进而引发维数灾难问题。在大规模数据中,这些方法将变得低效,且随着统计空间维数的增加,算法效果将逐渐退化。

千万亿次超级计算机的出现使得复杂、大规模、高分辨率的模拟计算成为可能,如何快速从庞大的数据中提取有用信息并实现高质量展示效果是体绘制研究的主要挑战。由高分辨率模拟结果引发的数据传输和I/O瓶颈阻塞问题降低了科学模拟研究的效率。针对数据量极大的模拟数据,常见做法是采用降采样、原位数据提取等方法对数据进行约简,进而在资源有限的后处理机器上进行分析及可视化^[14,15]。Jung等^[16]通过对射线经过的两个最大剖面的显著度进行分析,组合多个基于显著性定义的分量形成传递

函数, 进而对感兴趣的区域进行体绘制。Wang 等^[17]提出了一种基于图像和分布的大规模数据表示方法, 将图像作为代理在后处理机器上探索传输函数设计方案, 利用可视化结果辅助理解物理现象。本文同样在图像空间中进行分析, 以应对模拟规模不断增加的趋势。针对 CME 行星际传播数值模拟结果, 在时域及频域空间中分析不同时间步切面图像, 并根据分析结果提取运动区域实现三维数据的约简, 最后设计颜色反映射算法, 根据不同时刻的 CME 特征检测结果自动调整传输函数, 增强 CME 区域信息展示。

1 TFTV 算法

1.1 基本思想

为便于模型模拟结果可视化分析, 提高模拟数据可视化的有效性和实用性, 针对时变数值模拟结果的三维可视化提出 TFTV(Transfer Function for Time-varying Volume data, TFTV)算法。TFTV 算法的基本过程如下: 基于 KNN 背景差分法确定运动区域

外接矩形并提取图像及三维运动子集, 利用 FT 显著性算法在运动区域图像中检测 CME, 并依赖 CME 检测结果设计颜色反映射算法查找各时间步 CME 与背景的分界阈值, 进而基于阈值自适应调整传输函数对局部运动区域中的 CME 实现快速三维可视化。TFTV 算法总体框架如图 1 所示。

1.2 体绘制传输函数设计方案

1.2.1 基于 KNN 背景差分法及 FT 显著性算法的 CME 检测过程

CME 在行星际空间传播时所到区域表现为速度、密度、磁场等物理属性的显著增强, 持续一段时间后恢复平静^[18]。速度及密度是 CME 的两个关键属性。标准化处理消除径向梯度的密度及径向速度以去除两个属性值的量纲差异, 进而计算两者乘积为相对动量, 并将相对动量作为展示 CME 结构的映射标量。通过提取各时间步上体数据赤道切面图像形成视频, 从时域及频域特征出发, 在切面视频中利用 KNN 背景差分法(K-Nearest Neighbors background subtraction method)及 FT 显著性算法(Fre-

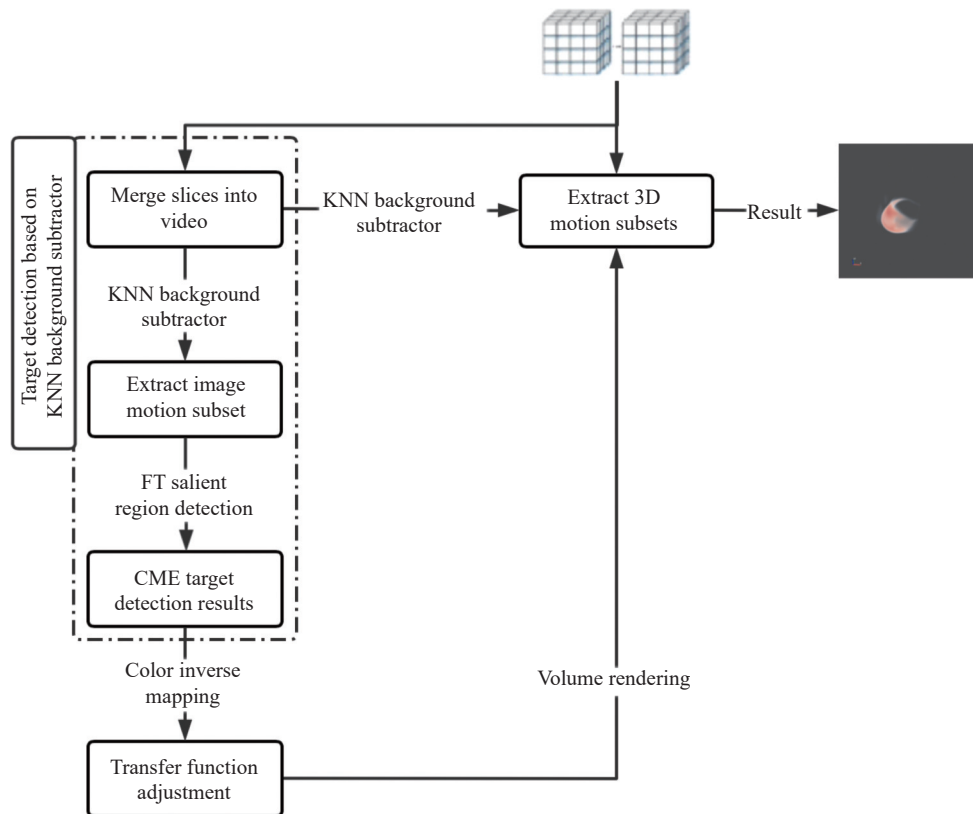


图 1 TFTV 算法框架

Fig. 1 Framework of TFTV algorithm

quency Tuned Salient Region Detection method) 检测 CME。

KNN 背景差分法通过保存历史帧并学习当前帧实现背景模型的实时更新, 捕捉表现为前景的动态特征, 在渐变场景下可以取得很好的效果^[19]。对比高斯混合模型等参数概率密度估计算法, KNN 算法能够快速检测到进入窗口的物体, 对自太阳向外抛射的 CME 提取具有明显的优越性。无参数概率密度估计方法也为建立样本模型提供更大的自由度, 对数值模拟结果中静态及渐变动态背景数值模拟结果具有较好适用性。在频域中图像可以分为低频和高频两部分, 高频部分反映了图像的细节信息, 低频部分反映了图像的整体信息, FT 显著性检测算法使用 5×5 的高斯核过滤纹理、噪声等高频区域, 主要关注低频信息, 适合整体对象的识别及分割^[20]。本文基于 KNN 背景差分法及 FT 显著性算法设计的 CME 检测算法过程如下。

KNN 背景差分法使用统一的高斯核函数 K 对历史帧数据 $\mathbf{X}_T$ 中位于核体积 V 内样本进行计数, KNN 分类算法^[21] 对异常值具有鲁棒性且不需要先验数据, 基于 KNN 分类思想根据新样本在特征空间中的 k 个最相邻样本的类别判断该样本所属类别, 像素 $\mathbf{x}^{(t)}$ 的时域概率分布模型为

$$p(\mathbf{x}^{(t)} | \mathbf{X}_T, \mathbf{B} + \mathbf{F}) = \frac{1}{TV} \sum_{m=t-T}^t K \left(\frac{\|\mathbf{x}_m - \mathbf{x}^{(t)}\|}{D} \right) = \frac{k}{TV}. \quad (1)$$

其中, $\|\mathbf{x}_m - \mathbf{x}^{(t)}\|$ 表示当前像素 $\mathbf{x}^{(t)}$ 与前 T 帧像素的 L2 范数差异; 若 $u < 1/2$, $K(u) = 1$, 否则 $K(u) = 0$; $\mathbf{B}$, $\mathbf{F}$ 分别为 t 时刻前景、背景分布矩阵; 体积 V 是直径为 D 的超球面; 比较概率 p 与阈值 $c_{\text{thr}} \sim 1/V$ 判断像素属于背景或前景, $k = [0.1T]$ 以适应异常值。

此外, 背景模型需要不断更新以适应场景的变化。基于 Elgammal 等^[22] 建立的长短期更新机制更新模型, 以适应敏感及稳定变化, 并建立指标 $b^{(1)}, \dots, b^{(T)}$, 前景区域 $b^{(m)} = 0$, 背景区域 $b^{(m)} = 1$, 像素 $\mathbf{x}^{(t)}$ 为背景的概率密度估计模型为

$$\hat{p}(\mathbf{x}^{(t)} | \mathbf{K}_T, \mathbf{B}) \approx \frac{1}{TV} \sum_{m=t-T}^t b^{(m)} K \left(\frac{\|\mathbf{x}_m - \mathbf{x}^{(t)}\|}{D} \right). \quad (2)$$

背景的概率 $\hat{p}(\mathbf{x}^{(t)} | \mathbf{K}_T, \mathbf{B})$ 小于前景阈值 c_{thr}^{b-1} 的像素点为潜在的前景区域赋值 255, 大于背景阈值 c_{thr}^b 的像素点被分类为背景赋值 0, 其余像素点被归类为阴影赋值 127。KNN 背景差分法将所有像素点 $\mathbf{C}(x, y, t)$ 分为前景、阴影及背景 3 类, 其中单个时刻像素点类别分布矩阵可表示为 $\mathbf{C}(x, y)$ 。

图像进行二值化操作。将像素点值 $\mathbf{C}(x, y)$ 小于 200 的区域赋值为 0, 仅保留前景区域 $\mathbf{C}_{\text{FG}}(x, y)$, 然后基于结构元 $\mathbf{A}$ 先腐蚀后膨胀开操作处理 $\mathbf{C}_{\text{FG}}(x, y)$ 以去除背景中的点状前景噪声、平滑形状边界、断开物体之间的细小连接, 即

$$\mathbf{C}_{\text{FG}}(x, y) \circ \mathbf{A} = \cup \{(\mathbf{A})_z | (\mathbf{A})_z \subseteq \mathbf{C}_{\text{FG}}(x, y)\}. \quad (3)$$

其中, $\cup \{\cdot\}$ 表示大括号中所有集合的并集, $\mathbf{A}$ 为十字形结构元, $\circ$ 表示开操作, z 表示位移量, 通过拟合 $\mathbf{C}_{\text{FG}}(x, y)$ 中 $\mathbf{A}$ 的所有 z 平移得到 $\mathbf{C}_{\text{FG}}(x, y) \circ \mathbf{A}$ 。

基于 $\mathbf{C}_{\text{FG}}(x, y) \circ \mathbf{A}$ 提取图像中包含运动前景 CME 的外接矩形区域 $\mathbf{R}_{\text{img}}(x, y)$, 并在体数据中提取包含 CME 的三维运动子集 $\mathbf{R}_{\text{vol}}(x, y, z)$ 。假设图像中心点为 $(x_{\text{center}}, y_{\text{center}})$, 外接矩阵的左上角坐标为 $(x_{\text{left}}, y_{\text{left}})$, 宽为 w , 高为 h , p 为真实距离与像素的比值, 则由式(4)定位三维子集的位置。

$$\begin{cases} x \in [(y_{\text{left}} - y_{\text{center}})p, (y_{\text{left}} - y_{\text{center}} + h)p]; \\ y \in [(x_{\text{left}} - x_{\text{center}})p, (x_{\text{left}} - x_{\text{center}} + w)p]; \\ z \in [-(\max(w, h)p)/2, (\max(w, h)p)/2]. \end{cases} \quad (4)$$

FT 显著性算法将原图和高斯核过滤后的图像从 RGB 颜色空间中转换到包含一个亮度通道和两个颜色通道组成的 Lab 颜色空间, 由式(5)计算 $\mathbf{R}_{\text{img}}(x, y)$ 区域颜色向量均值相对于高斯滤波后图像的欧氏距离作为各像素点的显著性水平, 即

$$\mathbf{S}(x, y) = \|\mathbf{I}_\mu - \mathbf{I}_w(x, y)\|. \quad (5)$$

其中, $\mathbf{I}_\mu = [L_\mu, a_\mu, b_\mu]$ 为原图在 Lab 颜色空间像素向量的平均值, $\mathbf{I}_w$ 为像素点高斯滤波后在 Lab 颜色空间的向量值, 由下式得到最终运动区域显著图:

$$\mathbf{P}_{\text{AX}}(x, y) = \mathbf{S}(x, y) / \mathbf{S}(x, y)_{\text{max}}. \quad (6)$$

由于低频域显著性更强, 运动区域中 CME 相对于其他区域轮廓对比度更加明显, 在运动区域显著图中利用 Canny 边缘检测算法得到边缘像素显著性均值 $P_{\text{AX}}^{\text{edge}}$, 最终 CME 检测结果 $\mathbf{D}(x, y)$ 为

$$\mathbf{D}(x, y) = [\mathbf{C}_{\text{FG}}(x, y) \circ \mathbf{A}] \cap [\mathbf{P}_{\text{AX}}(x, y) > P_{\text{AX}}^{\text{edge}}]. \quad (7)$$

1.2.2 颜色反射算法

颜色反射算法为数值到颜色的反射过程,即颜色空间到原始数据值的过程。值得注意的是,数值到颜色的映射过程中首先将原始数值归一化到 $[0, 1]$ 区间内,然后建立数值到颜色的映射关系,颜色映射及反射过程如图 2 所示,颜色反射算法主要有以下三步。

步骤 1 基于 CME 检测结果 $D(x, y)$, 获取该区域像素点的 RGB 颜色分量 $\mathbf{X}_{\text{RGB}}$ 。

步骤 2 根据颜色映射过程中构建的颜色映射表 $\mathbf{X}_{\text{Table}} \sim \mathbf{Y}_{\text{norm}}$, 查找颜色表中与各像素点 $\mathbf{X}_{\text{RGB}}^i$ 欧氏距离最短的颜色分量 $\text{index}(\|\mathbf{X}_{\text{RGB}}^i - \mathbf{X}_{\text{Table}}\|_{\min})$ 所对应的归一化后属性值 $\mathbf{Y}_{\text{norm}}^i$, 其中 $0 < i \leq M$, M 为 $D(x, y)$ 区域像素点个数。

步骤 3 基于颜色映射过程中所使用的归一化函数 f 以及归一化后属性值 $\mathbf{Y}_{\text{norm}}$ 计算前景 CME 区域均值 $\sum_{0 < i \leq M} (f^{-1}(\mathbf{Y}_{\text{norm}}^i)/M)$ 作为阈值 r , f^{-1} 为归一化函数 f 的反函数。

1.2.3 基于阈值的传输函数

体绘制技术能够对大规模数据中复杂物理三维特征提供直观形象的展示,体绘制的关键在于传输函数的设计,传输函数通过定义数据值与颜色、不透明度等视觉元素之间的映射关系实现不同可视化效果。传输函数的颜色以及不透明度映射规则如下。(1)颜色映射:颜色映射区间由参与映射的标量值范围确定,以相对动量为例,其中 CME 对应相对动量较大的区域。(2)不透明度映射:不同于 Paraview^{*} 和 Visit^{**} 等可视化软件常用的线性映射规则,基于逻辑回归预测模型中常用的 sigmoid 函数^[23], 根据 KNN 背景差分法及 FT 显著性算法提取 CME 检测

结果并根据颜色反射算法确定阈值 r , 将参与映射的标量值区间划分为非特征区域及特征区域两类并分别设计不透明度,根据 r 将属性值转换为 $0 \sim 1$ 的概率值,最终不透明度根据属性值位于特征区域的概率决定,具体映射方案如下:

$$f(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}}. \quad (8)$$

其中,属性值小于 r 的值映射到 $[-10, 0]$ 内,属性值大于 r 的值映射到 $[0, 10]$ 内,将参与映射的相对动量属性值归一化到 $x \in [-10, 10]$ 区间内计算其位于特征区域的概率。此外,可以调整最大不透明度,以更好地展现内部结构。基于阈值设计的不透明度映射函数及 Paraview 与 Visit 三维可视化软件常用的线性映射函数作用在参与映射的标量值区间上的效果如图 3 所示。

2 实验与结果分析

2.1 实验数据

数值模拟方法在观测数据有限的空间科学领域中被广泛应用。因此,针对数值模拟结果设计有效的可视化分析算法有助于复杂物理特征的发现和了解,直观的可视化结果亦能满足稳步增加的空间天气数值模拟结果的快速分析需求。设计 TFTV 算法简化传输函数设计过程,以整合速度及密度特征的相对动量为例,给出时变太阳风暴数值模拟结果中 CME 三维结构及传播演化状态。基于 SIP-CESE(Solar InterPlanetary-Conservative Element Solution Element, SIP-CESE)模型^[24] 及空间天气模型的协同建模中心(Community Coordinated Modeling Center, CCMC)提供的在线运行 CORHEL(CORonal and

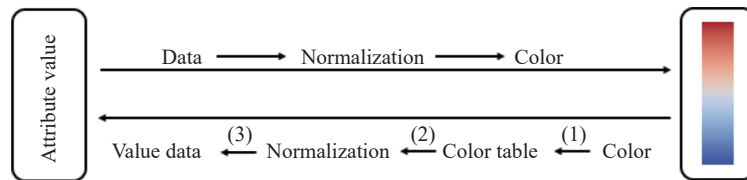


图 2 颜色映射及反射过程

Fig. 2 Color map and reflection process

* <https://www.paraview.org/>

** <https://wci.llnl.gov/simulation/computer-codes/visit>

HELiospheric model, CORHEL) 模型^{*}生成的 4 个 CME 事件数值模拟结果开展实验。事件 A: SIP-CESE 模型在共转坐标系中 2194 卡林顿周(CR2194)背景太阳风条件下,借助球形等离子体 CME 模型生成的行星际传播数值模拟结果,模拟过程以及参数设置详见 Zhou 等^[25]相关的数值模拟研究。事件 B: SIP-CESE 模型在共转坐标系中 2154 卡林顿周(CR2154)背景太阳风条件下,借助渐变圆柱壳(GCS)CME 模型生成的行星际传播数值模拟结果,主要模拟过程详见 Liu 等^[18]数值模拟研究。事件 C: CORHEL 模型在日面坐标系中 2185 卡林顿周(CR2185)背景太阳风条件下,借助锥形 CME 模型生成的行星际传播数值模拟结果,模拟参数设置详见 CCMC 在线运行结果^{**}。事件 D: CORHEL 模型在日面坐标系中 2154 卡林顿周(CR2154)背景太阳风条

件下,借助锥形 CME 模型生成的行星际传播数值模拟结果,模拟参数设置详见 CCMC 在线运行结果^{***}。表 1 给出 4 个参与实验的 CME 行星际传播数值模拟结果的数值网格及模拟区域。

2.2 实验结果与分析

结合物理理论及观测结果的数值模拟方法能够定量地给出太阳事件爆发后日地空间中物理参数的时空变化,CME 是近地空间环境的主要扰动源,模拟结果中 CME 三维结构及传播演化过程的研究对行星际空间天气现象和提高空间天气预报能力具有重要意义。基于表 1 描述的 4 个 CME 数值模拟结果开展实验,包含不同卡林顿周对应的行星际太阳风背景及球形等离子体模型、GCS 模型、锥模型 3 种典型 CME 模型,可视化物理参数均为相对动量,相对动量为消除径向梯度的密度及径向速度经无量纲化处理

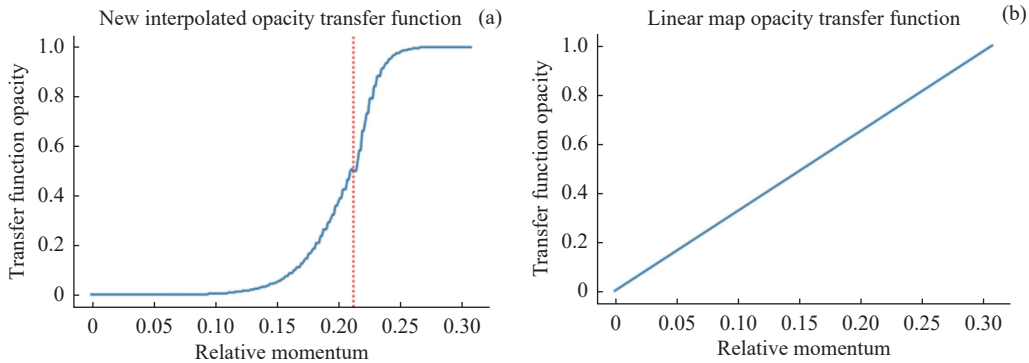


图 3 (a) 基于阈值设计的新不透明度映射函数,红色虚线为阈值。(b) Paraview 与 Visit 三维可视化软件常用的一般线性函数不透明度映射函数

Fig. 3 (a) New opacity mapping function based on threshold design, the red dotted line is the threshold. (b) General linear function opacity mapping function commonly used in Paraview and Visit 3D visualization software

表 1 数值网格与模拟区域

Table 1 Numerical grid and simulation region

数值模型	事件	网格大小	半径范围/ R_s	卡林顿周
SIP-CESE	A	$300(x) \times 300(y) \times 300(z)$	1 ~ 225	CR2194
	B	$192(r) \times 181(\theta) \times 361(\phi)$	21.5 ~ 235	CR2154
CORHEL	C	$320(r) \times 60(\theta) \times 180(\phi)$	30 ~ 245	CR2185
	D	$160(r) \times 30(\theta) \times 90(\phi)$	30 ~ 245	CR2154

^{*} <https://ccmc.gsfc.nasa.gov/models/modelinfo.php?model=CORHEL/MAS/WSA/ENLIL/>

^{**} https://ccmc.gsfc.nasa.gov/results/viewrun.php?domain=SH&runnumber=yan_zhu_033022_SH_2

^{***} https://ccmc.gsfc.nasa.gov/results/viewrun.php?domain=SH&runnumber=yan_zhu_040122_SH_3

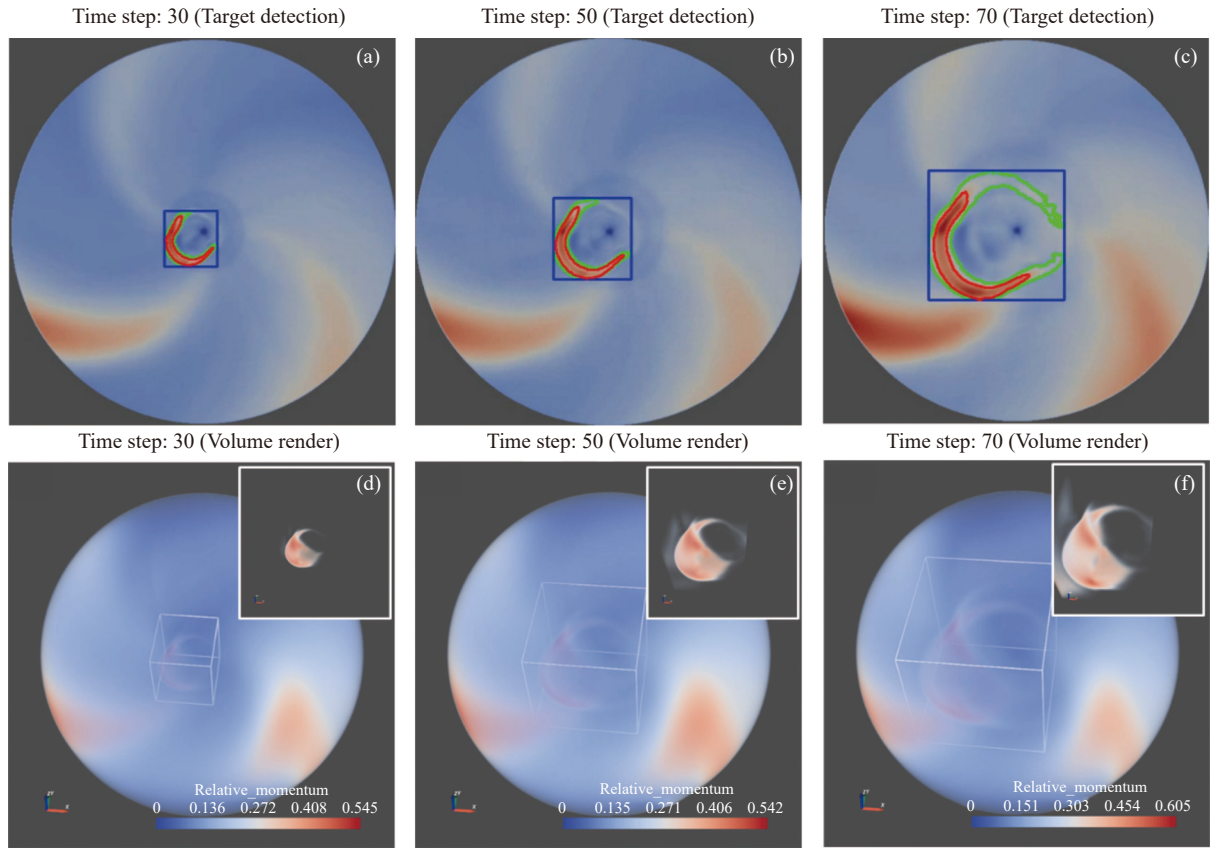


图 4 事件 A: 第 30, 50, 70 三个时间步体数据相对动量的赤道面检测结果及体绘制结果。(a)~(c) 中红绿蓝轮廓分别表示本文 CME 最终检测结果、KNN 背景差分法检测结果、运动区域外接矩形, (d)~(f) 大图为线性映射的体绘制效果、内部白色边框为提取的运动子集、右上小图为本文 TFTV 体绘制效果

Fig. 4 Event A: the equatorial plane detection results and volume rendering results of the relative momentum volume data at 30th, 50th, and 70th time steps. In (a)~(c), the red, green and blue outlines respectively represent the final detection result of CME, the detection result of KNN background subtraction method, outer boundary of the moving area. In (d)~(f), the large is the volume rendering result of linear mapping, the inner white border is the extracted motion subset, the upper right is the TFTV volume rendering result in this article

后的乘积, CME 区域中相对动量占优。

图 4 和图 5 分别给出了 SIP-CESE 模型在共转坐标系下两个不同 CME 事件的赤道面检测结果及相对动量在不同传输函数作用下的体绘制效果。检测结果表明, 共转坐标系构建的静态背景环境中: KNN 背景差分法能够识别出包含 CME 及其扰动在内的运动区域, 基于 KNN 背景差分法及 FT 显著性设计的 CME 检测算法能够在不同时间步数据中自动定位 CME 区域, 有效避免数值近似区域及边缘扰动对 CME 提取的影响; TFTV 算法在基于 SIP-CESE 模型的数值模拟结果中 3 个时间步的体绘制效果均相对完整地呈现了 CME 的三维结构, 避免了一般线性映射方案下体绘制效果中视线方向上的背景环境

对 CME 可视化的遮挡, 通过提取运动区域子集减少体绘制计算量, 基于各时间步检测结果自适应调整传输函数简化了传输函数设计过程, 实现了局部运动区域中 CME 的快速三维可视化。但图 4(d)~(f) 右上小图由于仅对相对动量单一属性调整传输函数, 体绘制结果中存在有少部分杂质。

图 6 与图 7 分别给出了 CORHEL 模型在日面坐标系下两个不同 CME 事件的赤道面检测结果及相对动量在不同传输函数作用下的体绘制效果。检测结果表明, 日面坐标系构建的渐变背景环境中: 基于 KNN 背景差分法及 FT 显著性设计的 CME 检测算法能够检测到 CME 区域, 有效避免了 KNN 背景差分法识别出的 CME 后侧空腔及其边缘扰动对检测结

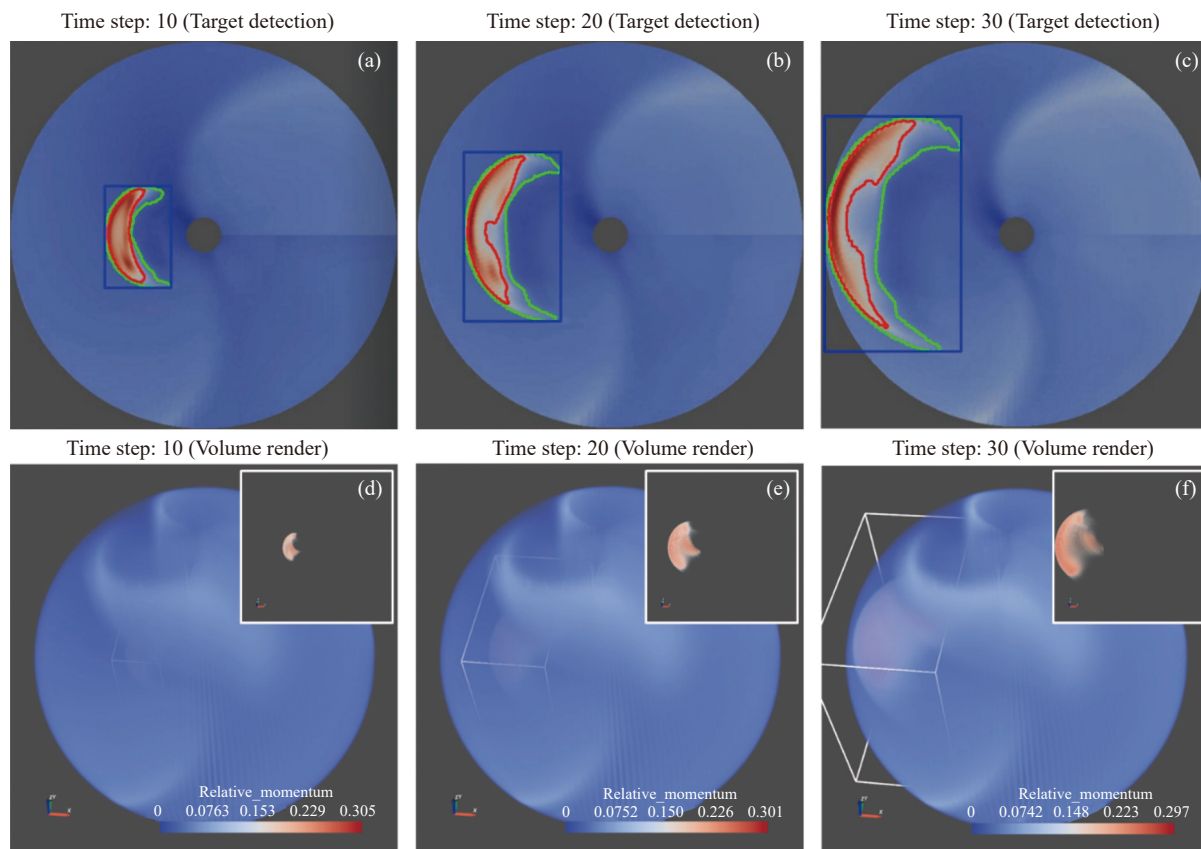


图5 事件B: 第10, 20, 30三个时间步体数据相对动量的赤道面检测结果及体绘制结果。(a)~(c)中红绿蓝轮廓分别表示本文CME最终检测结果、KNN背景差分法检测结果、运动区域外接矩形,(d)~(f)大图为线性映射的体绘制效果、内部白色边框为提取的运动子集、右上小图为本文TFTV体绘制效果

Fig. 5 Event B: the equatorial plane detection results and volume rendering results of the relative momentum volume data at 10th, 20th, and 30th time steps. In (a)~(c), the red, green and blue outlines respectively represent the final detection result of CME, the detection result of KNN background subtraction method, outer boundary of the moving area. In (d)~(f), the large is the volume rendering result of linear mapping, the inner white border is the extracted motion subset, the upper right is the TFTV volume rendering result in this article

果的影响; TFTV 算法在 CORHEL 模型数值模拟结果中 3 个时间步的体绘制结果均相对完整地呈现了 CME 的三维结构。相较于常见线性映射规则下的体绘制结果, 该方法有效避免了视线方向的遮挡, 通过提取运动子集进行体绘制提高了绘制效率, 基于各时间步检测结果自适应调整传输函数简化了传输函数设计过程, 最终在各时间步提取的局部运动区域实现 CME 快速三维可视化。

本文设计的 TFTV 时变模拟数据体绘制传输函数设计方案自动提取特征区域并自适应调整各时刻传输函数, 相对于传统人工筛选、定位、调整的方法简化了传输函数设计过程。在共转坐标系下的 SIP-CESE 模型模拟结果及日面坐标系下的 CORHEL 模

型模拟结果的测试效果表明, 该算法在静态及动态背景环境中均能够清晰地展示 CME 三维结构, 避免了 CME 可视化视线方向的遮挡。运动区域的提取减少了冗余数据, 借助算法在时域及频域空间自动分析数据并基于数据特征实现传输函数的自适应调整, 自动高效地呈现了相对动量的变化, 示踪 CME 在行星际空间中的演化过程。仅针对相对动量单一属性设置传输函数无法分辨数值相近的特征, 运动子集的提取降低了较远区域的干扰但仍存在小部分与 CME 相近的区域。因此, 体绘制结果中存在少量杂质但所占比例较小, 不影响 CME 整体三维结构的可视化效果。此外, 基于图像的分析方式使传输函数设计过程更加直观, 将三维数据降低到二维空间减少了计算量, 为

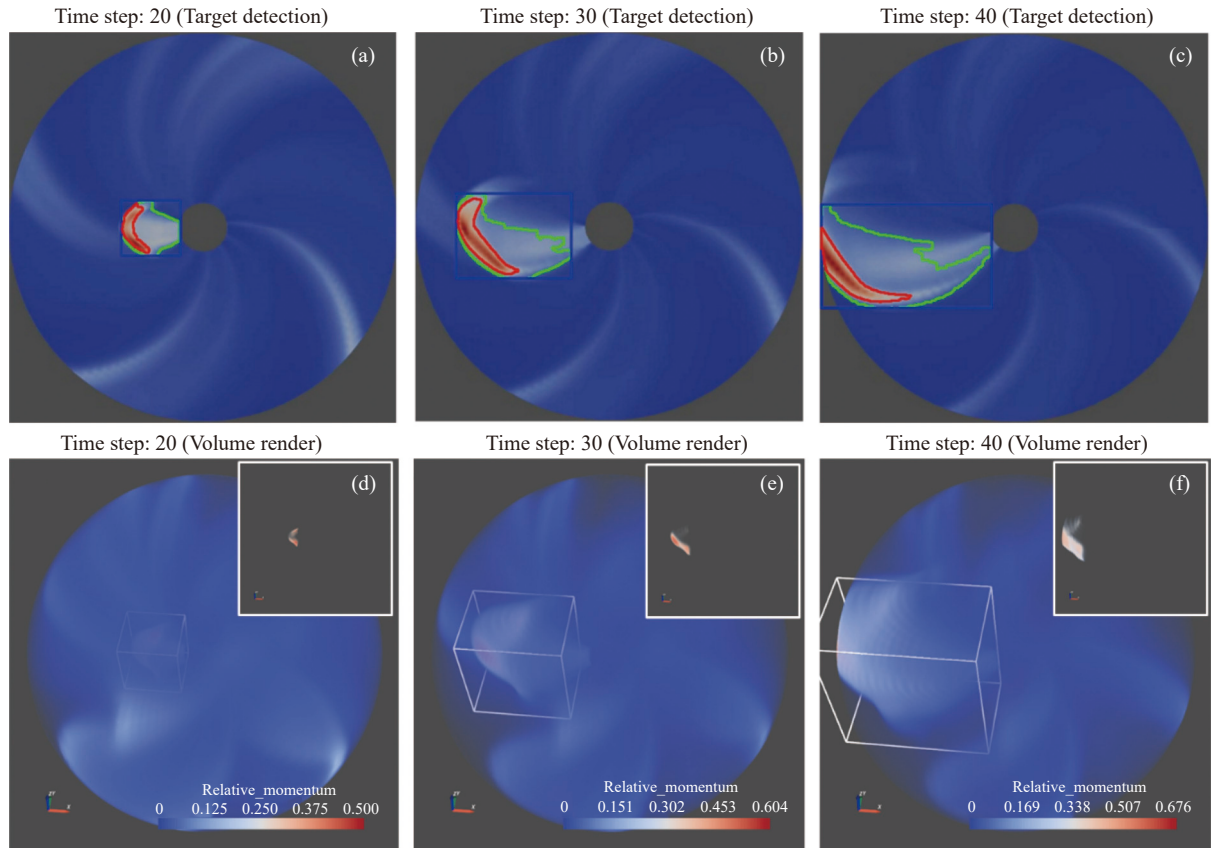


图 6 事件 C: 第 20, 30, 40 三个时间步体数据相对动量的赤道面检测结果及体绘制结果。(a)~(c) 中红绿蓝轮廓分别表示本文 CME 最终检测结果、KNN 背景差分法检测结果、运动区域外接矩形, (d)~(f) 大图为线性映射的体绘制效果、内部白色边框为提取的运动子集、右上小图为本文 TFTV 体绘制效果

Fig. 6 Event C: the equatorial plane detection results and volume rendering results of the relative momentum volume data at 20th, 30th, and 40th time steps. In (a)~(c), the red, green and blue outlines respectively represent the final detection result of CME, the detection result of KNN background subtraction method, outer boundary of the moving area. In (d)~(f), the large is the volume rendering result of linear mapping, the inner white border is the extracted motion subset, the upper right is the TFTV volume rendering result in this article

资源有限的后处理机器上分析超级计算机时变模拟结果提供了新思路, 提高了可视化的有效性和实用性。

3 结论

为便于模型模拟结果可视化分析, 提高模拟数据可视化的有效性和实用性, 针对时变模拟数据的体绘制提出 TFTV 算法, 以简化传输函数的设计过程。该算法基于图像的时域及频域特征自动分析数据, 并根据不同时间步分析结果自动调整传输函数, 实现局部运动区域中 CME 的快速三维可视化。将 TFTV 算法及常见的体绘制线性映射传输函数应用于 SIP-

CESE 模型静态背景及 CORHEL 模型动态背景下的 4 个 CME 行星际传播数值模拟结果。实验结果表明, 结合 KNN 背景差分法及 FT 显著性算法能够明显提高 CME 检测效果, 有效避免了边缘扰动、移动空腔及相近区域的影响; 与常见线性映射规则下的体绘制效果相比, TFTV 算法能够适应静态及动态背景下的数值模型结果, 仅针对运动子集进行体绘制且根据不同时间步检测结果自适应调整传输函数, 以直观的方式展示相对动量的变化, 示踪行星际空间 CME 的演化过程。局部区域的提取减少了数据冗余, 借助算法自动分析数据自适应调整传输函数的过程, 避免了人工提取及调整的低效性。

不同位置的空间特征可能具有相近的数值, 仅针

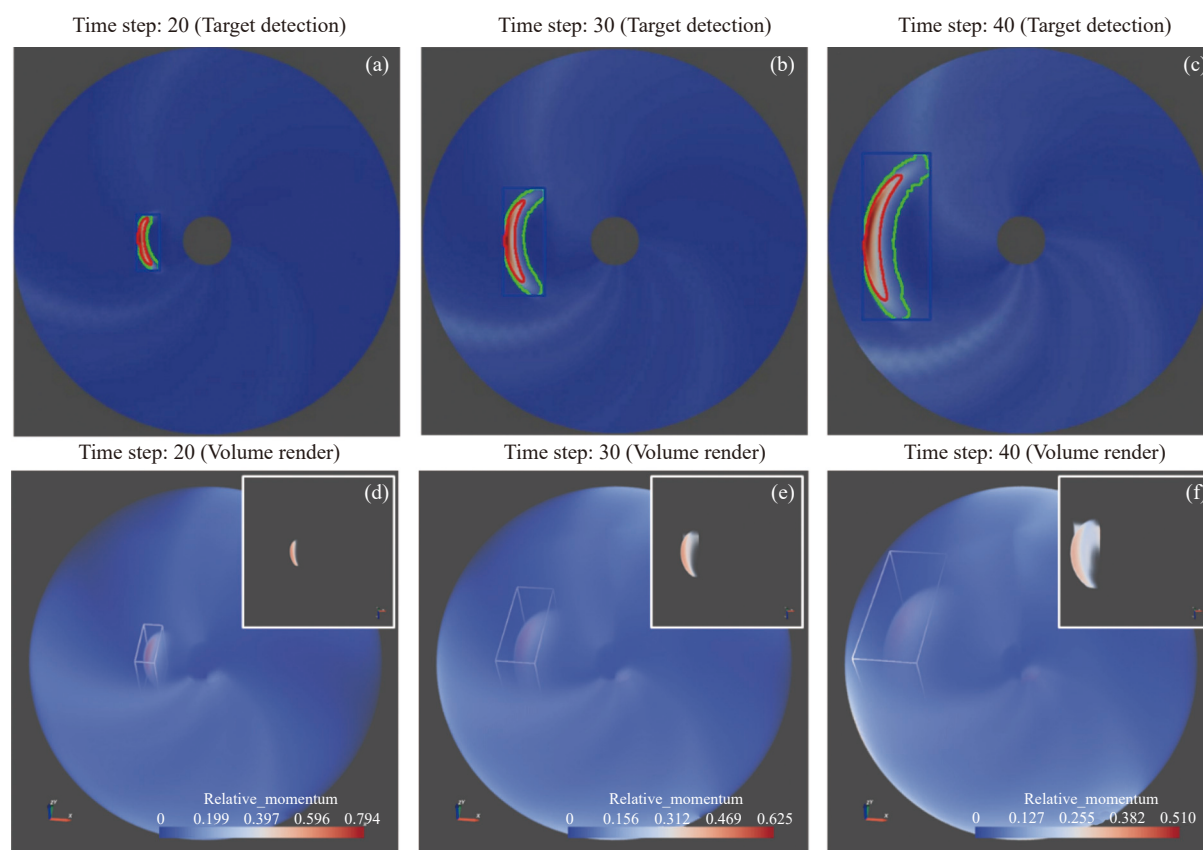


图7 事件D: 第20, 30, 40三个时间步体数据相对动量的赤道面检测结果及体绘制结果。(a)~(c)中红绿蓝轮廓分别表示本文CME最终检测结果、KNN背景差分法检测结果、运动区域外接矩形,(d)~(f)大图为线性映射的体绘制效果、内部白色边框为提取的运动子集、右上小图为本文TFTV体绘制效果

Fig. 7 Event D: the equatorial plane detection results and volume rendering results of the relative momentum volume data at 20th, 30th, and 40th time steps. In (a)~(c), the red, green and blue outlines respectively represent the final detection result of CME, the detection result of KNN background subtraction method, outer boundary of the moving area. In (d)~(f), the large is the volume rendering result of linear mapping, the inner white border is the extracted motion subset, the upper right is the TFTV volume rendering result in this article

对相对动量单一属性设置传输函数无法分辨这些特征,TFTV算法通过运动子集的提取降低了较远区域的干扰,最终绘制结果中存在小部分杂质但不影响CME整体结构的可视化效果。此外,本文以相对动量为例,示踪CME的演化过程,密度、磁场等多个特征参数亦能表征CME区域。下一步的工作重点是探索其他特征参数及高维传输函数,进一步提高绘制质量。

参考文献

- [1] MIKIĆ Z, DOWNS C, LINKER J A, *et al.* Predicting the corona for the 21 August 2017 total solar eclipse[J]. *Nature Astronomy*, 2018, 2(11): 913-921
- [2] BOCK A, PEMBROKE A, MAYS M L, *et al.* Visual verification of space weather ensemble simulations[C]//2015 IEEE Scientific Visualization Conference (SciVis). Chicago, IL, USA: IEEE, 2015: 17-24
- [3] CARLBAUM O, NOVÉN M. Real-time magnetohydrodynamic space weather visualization[D]. Linköping: Linköping University, 2017
- [4] ODSTRCIL D. Modeling 3 D solar wind structure[J]. *Advances in Space Research*, 2003, 32(4): 497-506
- [5] LJUNG P, KRÜGER J, GROLLER E, *et al.* State of the art in transfer functions for direct volume rendering[J]. *Computer Graphics Forum*, 2016, 35(3): 669-691
- [6] ROETTGER S, BAUER M, STAMMINGER M. Spatialized transfer functions[C]//Proceedings of the Seventh Joint Eurographics/IEEE VGTC Conference on Visualization. Leeds: Eurographics Association, 2005: 271-278
- [7] ŠEREDA P, VILANOVA A, GERRITSEN F A. Automat-

- ing transfer function design for volume rendering using hierarchical clustering of material boundaries[C]//Proceedings of the Eighth Joint Eurographics/IEEE VGTC Conference on Visualization. Lisbon: Eurographics Association, 2006: 243-250
- [8] LAN Y S, DING Y M, LUO X, *et al.* A clustering based transfer function for volume rendering using gray-gradient mode histogram[J]. *IEEE Access*, 2019, **7**: 80737-80747
- [9] MACIEJEWSKI R, WOO I, CHEN W, *et al.* Structuring feature space: A non-parametric method for volumetric transfer function generation[J]. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 2009, **15**(6): 1473-1480
- [10] WANG Y H, CHEN W, SHAN G H, *et al.* Volume exploration using ellipsoidal gaussian transfer functions[C]//2010 IEEE Pacific Visualization Symposium (PacificVis). Taipei, China: IEEE, 2010: 25-32
- [11] WANG Y H, CHEN W, ZHANG J, *et al.* Efficient volume exploration using the gaussian mixture model[J]. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 2011, **17**(11): 1560-1573
- [12] WANG Y H, ZHANG J, LEHMANN D J, *et al.* Automating transfer function design with valley cell-based clustering of 2 D density plots[J]. *Computer Graphics Forum*, 2012, **31**(3pt4): 1295-1304
- [13] ROPINSKI T, PRAßNI J, STEINICKE F, *et al.* Stroke-based transfer function design[C]//Proceedings of the Fifth Eurographics / IEEE VGTC Conference on Point-Based Graphics. Los Angeles, California, USA: Eurographics Association, 2008: 41-48
- [14] MA K L, WANG C L, YU H F, *et al.* In-situ processing and visualization for ultrascale simulations[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2007, **78**: 012043
- [15] WANG K C, LU K W, WEI T H, *et al.* Statistical visualization and analysis of large data using a value-based spatial distribution[C]//2017 IEEE Pacific Visualization Symposium (PacificVis). Seoul, Korea: IEEE, 2017: 161-170
- [16] JUNG Y, KIM J, KUMAR A, *et al.* Feature of interest-based direct volume rendering using contextual saliency-driven ray profile analysis[J]. *Computer Graphics Forum*, 2018, **37**(6): 5-19
- [17] WANG K C, SHAREEF N, SHEN H W. Image and distribution based volume rendering for large data sets[C]//2018 IEEE Pacific Visualization Symposium (PacificVis). Kobe, Japan: IEEE, 2018: 26-35
- [18] LIU Y S, SHEN F, YANG Y. Numerical Simulation on the propagation and deflection of fast coronal mass ejections (CMEs) Interacting with a corotating interaction region in interplanetary space[J]. *The Astrophysical Journal*, 2019, **887**(2): 150
- [19] ZIVKOVIC Z, VAN DER HELJDEN F. Efficient adaptive density estimation per image pixel for the task of background subtraction[J]. *Pattern Recognition Letters*, 2006, **27**(7): 773-780
- [20] ACHANTA R, HEMAMI S, ESTRADA F, *et al.* Frequency-tuned salient region detection[C]//2009 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Miami, FL, USA: IEEE, 2009: 1597-1604
- [21] COVER T, HART P. Nearest neighbor pattern classification[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 1967, **13**(1): 21-27
- [22] ELGAMMAL A, HARWOOD D, DAVIS L. Non-parametric model for background subtraction[C]//Proceedings of the 6th European Conference on Computer Vision. Dublin: Springer, 2000: 751-767
- [23] Zou X, Hu Y, Tian Z, *et al.* Logistic regression model optimization and case analysis[C]//2019 IEEE 7th International Conference on Computer Science and Network Technology (ICCSNT). IEEE, 2019: 135-139
- [24] FENG X. Magnetohydrodynamic Modeling of the Solar Corona and Heliosphere[M]. Singapore: Springer, 2020
- [25] ZHOU Y F, FENG X S. Numerical study of the propagation characteristics of coronal mass ejections in a structured ambient solar wind[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2017, **122**(2): 1451-1462