

BAO Lili, CAI Yanxia, LIN Ruilin, LIU Siqing, SHI Liqin, CAO Yong. A weight based hierarchical vector quantization algorithm for space environment volume data (in Chinese). *Chin. J. Space Sci.*, 2021, 41(3): 425-430. DOI:10.11728/cjss2021.03.425

基于权重的层次矢量量化体压缩算法 及其在空间环境中的应用^{*}

包黎莉^{1,2} 蔡燕霞^{1,2} 林瑞淋^{1,2}
刘四清^{1,2,3} 师立勤^{1,2,3} 曹 勇⁴

1(中国科学院国家空间科学中心 北京 100190)

2(中国科学院空间环境态势感知技术重点实验室 北京 100190)

3(中国科学院大学 北京 100049)

4(哈尔滨工业大学 (深圳) 机电工程与自动化学院 深圳 518055)

摘 要 空间环境数据可视化是空间环境预报和服务的重要手段. 目前基于矢量量化的压缩体绘制算法均只考虑了数据特点和压缩效果, 并未结合具体应用需求. 为适应空间环境体数据可视化具体应用需求, 提出了一种应用驱动的压缩体绘制算法——基于权重的层次矢量量化算法 (WHVQ). 算法将体数据划分为 4^3 的数据块, 并为数据块设置权重, 重点关注区域的数据块赋予相对较大的权重值. 然后, 对各数据块用三层结构表示. 最后, 对次高层和最高层分别采用基于权重的主成分分析分裂法产生初始码书, 并采用基于权重的 LBG 算法进行码书优化和量化. 实验结果表明, 该算法能够在保证整体压缩效果的同时, 提升局部重点关注区域的重构质量.

关键词 体绘制, 体压缩, 矢量量化, 空间环境数据

中图分类号 P 35, TP 391

A Weight Based Hierarchical Vector Quantization Algorithm for Space Environment Volume Data

BAO Lili^{1,2} CAI Yanxia^{1,2} LIN Ruilin^{1,2}
LIU Siqing^{1,2,3} SHI Liqin^{1,2,3} CAO Yong⁴

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

2(Key Laboratory of Science and Technology on Environmental Space Situation Awareness,
Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190)

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

4(School of Mechanical Engineering and Automation, Harbin Institute of Technology, Shenzhen 518055)

Abstract Visualization has been widely applied in space environment domain. However, com-

^{*} 北京市科技计划项目 (Y9D0Z2B410) 和深圳科技计划项目 (ZDSYS201707280904031) 共同资助

2019-12-12 收到原稿, 2020-08-24 收到修定稿

E-mail: baoll@nssc.ac.cn

pressed volume rendering algorithms based on VQ are concerned on fidelity and compression rate, not combined with specific application. To fulfill the specific visualization requirements for space environment volume data, an application-driven compression and rendering algorithm is proposed, which is Weight Based Hierarchical Vector Quantization (WHVQ). The volume data is initially partitioned into disjoint 4^3 blocks. Weights are assigned to the blocks according to their importance. The blocks are then decomposed into a three level hierarchical representation and each block is represented by a mean value and two detail vectors. To the top two levels, a splitting based on principal component analysis and weight is adopted to form their initial codebooks. Then, LBG algorithm based on weight is conducted for codebook refinement and quantization. The experimental results show that WHVQ is able to improve the quality of reconstruction in interested area on the premise of the good overall fidelity.

Key words Volume rendering, Volume compression, Vector quantization, Space environment data

0 引言

空间环境数据可视化是空间环境预报和服务的重要手段^[1-4]。借助于可编程图形硬件和光线投射法等体绘制算法,可以实时高质量地对复杂空间环境进行体可视化^[5,6]。随着高分辨率空间环境探测手段的发展,以及空间环境模型分辨率的不断提高,空间环境数据呈现爆炸式地增长。但硬件技术的发展速度远远赶不上数据量的增长速度,大规模空间环境体数据的实时交互可视化常常受到显存容量以及主存到显存带宽的制约。压缩体绘制(Compressed Volume Rendering, CVR)是一种结合了体压缩和体绘制的通用方法,其对压缩后的数据进行实时解压绘制,能够有效解决数据量增长与硬件配置之间的矛盾^[7]。矢量量化(Vector Quantization, VQ)是一种非对称的压缩算法,虽压缩复杂,但解压简单,且解压具有紧凑、可分离性和统一性的特点。因此,VQ已成为基于硬件CVR中的一个不错的选择^[7-9]。VQ技术最早是Ning等^[8,10]应用于体数据压缩的,后来多位学者针对简单矢量量化重构质量差的问题提出了改进的VQ算法,例如层次矢量量化(Hierarchical Vector Quantization, HVQ)算法^[9,11-14]、变换域矢量量化(Transform Vector Quantization, TVQ)算法^[7]、残差矢量量化(Residual Vector Quantization, RVQ)算法^[15]等,但这些方法均只考虑了数据特点和压缩效果,并未结合具体应用需求。为解决上述问题,本文在HVQ算法的基础上,提出了一种应用驱动的压缩体绘制算法——基于权重的层次矢量量化算

法(Weight Based Hierarchical Vector Quantization, WHVQ)。该算法能够根据空间环境体数据可视化的具体应用需求,在考虑整体重构质量的同时,着重保留局部重点关注区域的细节信息。

1 矢量量化算法

1.1 VQ 算法

VQ^[16]是将 k 维输入矢量 $\mathbf{X}$ 用码书中某个码字表示,并用码字的索引值代替 $\mathbf{X}$,解码则是利用索引值在码书中查找相应的码字。Ning等^[8,10]最早把VQ算法应用于体数据压缩,其基本思想是将 $N \times M \times K$ 维的体数据划分为若干个 n^3 维的数据块,并把块作为多维矢量进行整体量化。该算法简单,能获得较高的压缩比,但是重构质量差。为了提高重构质量,后来多位学者提出了改进的VQ算法,如HVQ算法、TVQ算法、RVQ算法等。

1.2 HVQ 算法

Schneider和Westerman^[9]提出了HVQ算法,并且在GPU上实现了压缩数据的实时解压和绘制。HVQ算法首先将原始体数据划分为 4^3 的大块,并把各大块进一步划分为8个 2^3 的小块。然后将大块内数据分为三层表示,最底层是大块均值,次高层是由小块均值与大块均值之差所构成的8维差分矢量,最高层是由大块内各数据与所在小块均值之差所构成的64维差分矢量。最后,算法对次高层和最高层分别进行矢量量化。HVQ算法将均匀或者空值区域的差分矢量直接映射为零矢量码字,简化量化编码过程。

另外, HVQ 算法对差分矢量进行量化, 从而更好地刻画细节, 提高重构质量. HVQ 算法还可以与 LOD (Level of Detail) 技术^[3]相结合, 在解压绘制阶段实现多分辨率实时绘制. 但 HVQ 算法没有结合具体的应用需求, 无法保证局部重点关注区域的重构质量. 在空间环境预报和研究过程中, 不仅需要大致了解空间环境的整体态势, 更需要详细掌握局部重点关注区域的细节信息. 例如, 在航天器在轨运行空间环境保障任务期间, 保障人员往往要重点密切监视航天器周围高能粒子等空间环境要素的分布状态. 因此, HVQ 算法不能满足空间环境体可视化的应用需求.

2 WHVQ 算法

2.1 基本思想

在 HVQ 算法的基础上, 考虑空间环境体数据可视化的具体应用需求, 提出了 WHVQ 算法. WHVQ 算法基本思想如下: 将体数据划分为 4^3 的数据块, 并为数据块设置权重, 重点关注区域的数据块赋予相对较大的权重值; 对数据块采用文献 [9] 中的三层结构表示; 基于权重对次高层和最高层分别进行矢量量化. 本文算法总体框架如图 1 所示.

2.2 矢量量化

Linde 等^[17]提出的 LBG 算法是目前最经典的矢量量化算法. 本文对 LBG 算法进行了改进, 提出了基于权重的 LBG 算法.

2.2.1 基于权重的 LBG 算法

基于权重的 LBG 算法能够结合权重计算失真和生成码字, 具体步骤如下.

步骤 1 给定初始码书 $C^{(0)} = \{Y_i^{(0)}\}_{i=1}^M \subset R^n$, 输入矢量集合 $I = \{X_i\}_{i=1}^N \subset R^n$, 权重集合 $W = \{w_i\}_{i=1}^N$. 令迭代次数 $k = 0$, 失真 $D^{(-1)} = \infty$, 设定误差阈值 ε ($0 < \varepsilon < 1$).

步骤 2 以码书 $C^{(k)}$ 中的码字作为各胞腔的聚类中心, 依据最佳划分原则把矢量集合 I 分成 M 个胞腔 $V^{(k)}$, $V_i^{(k)} = \{X \in I : \delta(X, Y_i^{(k)}) < \delta(X, Y_j^{(k)}), \forall j \neq i\}$, 其中 $j = 1, 2, \dots, M$, δ 为平方距离测度.

步骤 3 结合权重 W 计算失真 $D^{(k)} = \sum_{i=1}^M \sum_{X \in V_i^{(k)}} W_X \delta(X, Y_i^{(k)})$, 其中 W_X 为 X 对应的权重.

步骤 4 如果 $\left| \frac{D^{(k-1)} - D^{(k)}}{D^{(k)}} \right| < \varepsilon$, 则终止迭代, 码书 $C^{(k)}$ 就是所求的码书; 否则, 继续.

步骤 5 结合权重 W 和各胞腔 $V_i^{(k)}$ 计算新码字 $Y_i^{(k+1)} = \frac{\sum_{X \in V_i^{(k)}} W_X X}{\sum_{X \in V_i^{(k)}} W_X}$, 形成新码书 $C^{(k+1)} = \{Y_i^{(k+1)}\}_{i=1}^M$. 置 $k = k + 1$, 转至步骤 2.

基于权重的 LBG 算法能够优化和量化码书, 并利用胞腔对应码字的索引值对输入矢量进行编码. 解码则是利用索引值在码书中查找相应的码字.

基于权重的 LBG 算法是一种下降算法, 每次迭代总能减少失真并产生码书的局部变化. 因此, 初始码书的选择影响算法的收敛速度和最终码书性能. 主成分分析分裂法^[9]经常用于为 LBG 算法训练初始码书. 为了与基于权重的 LBG 算法相适应, 本文对主成分分析分裂法进行了改进, 提出了新的码书初始化策略——基于权重的主成分分析分裂法.

2.2.2 基于权重的主成分分析分裂法

基于权重的主成分分析分裂法从一个包含整个输入矢量集合 I 的胞腔 V_1 开始. 码字 $Y_1 = \frac{\sum_{X \in V_1} W_X X}{\sum_{X \in V_1} W_X}$, 失真 $D_1 = \sum_{X \in V_1} W_X \delta(X, Y_1)$. 这里构建一个双向链表, 定义一个组 $(D_1, Y_1, \xi = \{i \in \xi : X_i \in V_1\})$, 往双向链表中插入这个组. 在后续分裂时, 链表始终根据各组失真 D_j 的降序排序. 每次迭代时, 选择失真最大的组进行分裂, 直至生成

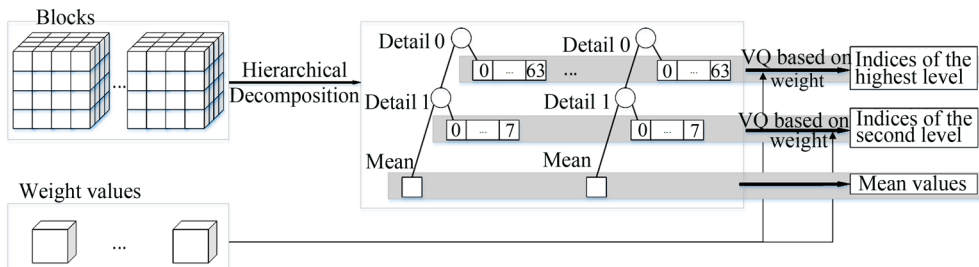


图 1 WHVQ 算法框架

Fig. 1 Framework of WHVQ algorithm

的码书达到指定的码字数. 每次分裂的步骤如下.

步骤 1 取双向链表中具有最大失真 D_j 的组 j .

步骤 2 结合权重 W 计算协方差矩阵:

$$M = \sum_{i \in \xi_j} W_{X_i} \cdot (X_i - Y_j) \cdot (X_i - Y_j)^t.$$

步骤 3 计算矩阵 M 的特征值和特征向量, 选择最大特征值 $\lambda_{\max}$ 所对应的特征向量 $e_{\max}$.

步骤 4 把该组划分为两个新组:

$$\xi_{\text{left}} = \{i \in \xi_j, \langle (Y_j - X_i), e_{\max} \rangle < 0\};$$

$$\xi_{\text{right}} = \{i \in \xi_j, \langle (Y_j - X_i), e_{\max} \rangle \geq 0\}.$$

步骤 5 计算新的码字 Y_{left} 和 Y_{right} , 以及对应的失真 D_{left} 和 D_{right} .

步骤 6 把两个新组插入双向链表中.

步骤 7 如果码书大小达到指定的个数, 则结束, 否则转至步骤 1.

每次分裂都会向码书增加一个新的码字, 分裂过程结束后, 可从双向链表中直接获得码书和失真.

3 实验结果与比较

辐射带高能质子是地球空间辐射环境重要的组成部分, 其中 $> 10 \text{ MeV}$ 的高能质子分布于中低轨道区域. 这些高能质子可通过辐射损伤效应和单粒子效应, 造成航天器异常或故障, 甚至造成航天器永久失效. 因此, 辐射带内高能质子分布预报及可视化对于航天器在轨运行保障等任务具有重要意义. 在航天任务过程中, 决策者不仅需要大致了解地球周围高能质子分布的整体情况, 更需要详细掌握航天器轨道位置及其附近高能质子分布的具体态势. 因此, 本文选取辐射带高能质子分布体数据, 分别采用 WHVQ 算法和 HVQ 算法进行压缩体绘制, 并对压缩性能进行了实验和比较.

本文实验均在 Windows 10 系统下进行, CPU 型号为 Intel(R) Core(TM) i7-8550U, 主频为 1.80 GHz, 内存容量为 20.0 GB, 系统类型为 64 位操作系统, 显卡为 NVIDIA Quadro P500. 编程环境为 Visual Studio 2017, 编译平台为 64 位, 编程语言为 C++ 和 CUDA C. 选取了 2019 年 9 月 20 日 00:00 UT 的 400~15 000 km 高度范围内的 $> 10 \text{ MeV}$ 高能质子平均单向积分通量数据, 数据量为 $360 \times 180 \times 292$ 个, 数据由 AP8 MIN 模式^[18] 计算得到. 数据经过常

用对数归一化处理, 由 $10^{-1} \sim 10^3 \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1}$ 映射至 0~255, 存储数据类型为 byte. 本文所关注航天器的轨道高度均在 500~600 km 范围, 因此将 $< 800 \text{ km}$ 的区域设置为重点关注区域, 其余为非重点关注区域. WHVQ 算法中重点关注区域的数据块权重 w_{in} 设置为 1.0, 非重点关注区域的数据块权重 w_{uin} 依次取为 0.1, 0.01 和 0.001. 码书大小依次取为 128, 256, 512 和 1024, 以研究不同码书大小下 WHVQ 和 HVQ 算法的压缩效果. 重构质量采用峰值信噪比 (Peak Signal-to-Noise Ratio, PSNR) 函数值进行评价. PSNR 越高, 表示失真越小, 即重构质量越好. 表 1 为算法重构质量的评价结果. 图 2 和图 3 分别为码书大小为 256 时算法在 550 km 和 10 000 km 高度的压缩效果.

从表 1 可以看出, 对于同一区域数据, 各算法的重构质量随着码书大小的增加而提高. 在各种码书大小情况下, HVQ 算法在重点关注区域的 PSNR 显著低于非重点关注区域以及整体的 PSNR. 这证明了本文观点, 即 HVQ 算法只考虑了整体的压缩效果, 并不能保证局部重点关注区域的重构质量. 从表 1、图 2 和 3 可以看出, 与 HVQ 算法相比, 非重点关注区域权重较小的 WHVQ 算法的整体 PSNR 较低, 这主要是因为在非重点关注区域重构质量降低, 但其在重点关注区域的重构质量显著升高, 说明本文算法能够结合空间环境应用需求重点刻画所关注局部区域的细节. 在重点关注区域权重相同的情况下, WHVQ 算法在非重点关注区域权重越小, 非重点关注区域的重构质量越低, 但重点关注区域的重构质量越高. 这说明本文 WHVQ 算法可以通过调节权重来权衡非重点关注区域和重点关注区域的重构质量. WHVQ 算法的权重有时需要根据应用需求和绘制效果进行多次调整, 从而可能导致压缩比较费时, 但这是可以接受的. 正如文献 [7, 8] 中提到的, CVR 中的压缩过程可以慢, 因为是离线一次性运行的.

WHVQ 算法的压缩比与权重无关, 且与 HVQ 算法一致, 计算公式参见文献 [11]. 本文实验中各算法在码书大小为 128, 256, 512, 1024 时的压缩比依次为 22.26, 19.70, 17.07, 14.23. WHVQ 算法的解压绘制方法与 HVQ 算法相同, 本文实验的帧率均在 30 fps 左右.

本文提出的 WHVQ 算法也适用于电子辐射带、中高层大气、磁层磁场等空间环境体数据的压缩和

表 1 不同码书大小 WHVQ 算法与 HVQ 算法的 PSNR(单位: dB)

Table 1 PSNR values of WHVQ and HVQ with different size of codebook (Unit: dB)

码书大小	评价区域	HVQ 算法	WHVQ 算法 ($w_{in} = 1$)		
			$w_{uin} = 0.1$	$w_{uin} = 0.01$	$w_{uin} = 0.001$
128	整体	39.10	38.57	37.22	35.00
	重点关注区域	28.34	31.20	33.12	33.74
	非重点关注区域	39.56	38.75	37.28	35.01
256	整体	40.68	40.23	38.83	36.94
	重点关注区域	29.98	34.48	37.89	38.97
	非重点关注区域	41.13	40.34	38.84	36.93
512	整体	42.77	42.19	40.96	39.23
	重点关注区域	32.19	38.38	43.53	47.21
	非重点关注区域	43.21	42.25	40.95	39.19
1024	整体	44.95	44.67	43.79	42.89
	重点关注区域	35.10	42.87	49.73	58.45
	非重点关注区域	45.31	44.69	43.76	42.85

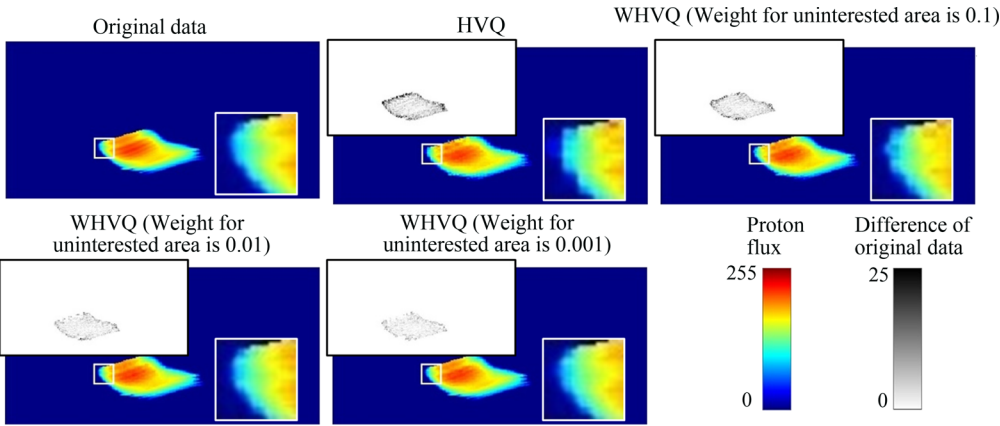


图 2 高能质子积分通量在 550 km 高度的 WHVQ 算法和 HVQ 算法压缩效果比较 (大彩图为绘制效果, 左上角黑白图为压缩数据与原始数据差值分布, 右下角彩图为白框区域的局部放大效果)

Fig. 2 Comparison of rendering high energy proton flux at 550 km using WHVQ and HVQ (Big colorful figures show the rendering results. The upper left gray figures show the corresponding difference with respect to the original data. The lower right colorful figures are the enlarged view of the white framed in the big figures)

绘制. 此外, 该算法还可以进一步拓展应用于其他领域的体数据压缩和绘制.

4 结论

提出了一种应用驱动的压缩体绘制算法, 即基于权重的层次矢量量化算法 (WHVQ). 该算法能够结合空间环境体数据可视化的具体应用需求, 在考虑整体绘制效果的同时, 着重刻画局部重点关注区域的

细节.

将 WHVQ 算法与常用的 HVQ 算法应用于辐射带高能质子分布体数据的压缩和绘制. 实验结果表明, 与 HVQ 算法相比, WHVQ 算法更加灵活, 能够通过权重来权衡非重点关注区域和重点关注区域重构质量. 应用 WHVQ 算法时仅对非重点关注和重点关注两类区域的权重进行简单赋值, 下一步的工作是将其拓展应用于多个不同程度重点关注区域, 并考虑采用权重函数.

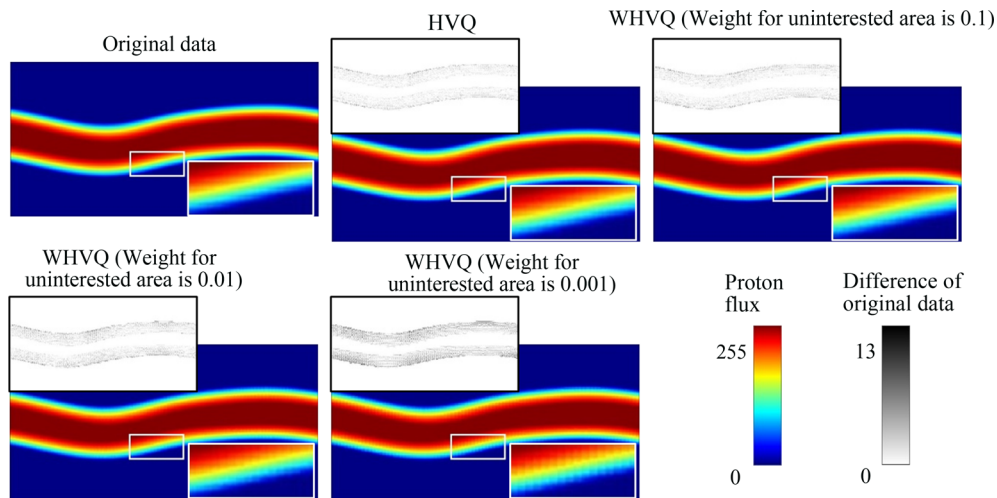


图3 高能质子积分通量在 10000 km 高度的 WHVQ 算法和 HVQ 算法压缩效果比较 (大彩图为绘制效果, 左上角黑白图为压缩数据与原始数据差值分布, 右下角彩图为白框区域的局部放大效果)

Fig.3 Comparison of rendering high energy proton flux at 10000 km using WHVQ and HVQ (Big colorful figures show the rendering results. The upper left gray figures show the corresponding difference with respect to the original data. The lower right colorful figures are the enlarged view of the white framed in the big figures)

参考文献

- [1] BOCK A, PEMBROKE A, MAYS M L, *et al.* Visual verification of space weather ensemble simulations[C]//2015 IEEE Scientific Visualization Conference (SciVis). Piscataway: IEEE, 2016: 17-24
- [2] GONG J C, CAI Y X, LIU S Q, *et al.* Development of operational space environment technology system[J]. *Chin. J. Space Sci.*, 2016, **36**(5): 753-761
- [3] HU Yasi, SONG Junjun, SHI Peng, *et al.* Study on 3D subdivision mode and encoding in heliocentric coordination system[J]. *Chin. J. Space Sci.*, 2016, **36**(1): 106-116
- [4] PIROTTI F, BROVELLI M A, PRESTIFILIPPO G, *et al.* An open source virtual globe rendering engine for 3D application: NASA world wind[J]. *Open Geospatial Data, Software Standards*, 2017, **2**(1): 4-17
- [5] WANG Song, WANG Haiyang, WU Yadong, *et al.* Improved VolumeLIC rendering technology of 3D vector field based on GPU acceleration[J]. *J. Comput. Aid. Desig. Comput. Graph.*, 2016, **28**(5): 723-732
- [6] CHEN Weifeng, CHEN Wei, CHEN Haidong, *et al.* An energy-saving color scheme for direct volume rendering[J]. *Comput. Graph.*, 2016, **54**: 57-64
- [7] FOUT N, MA K L. Transform coding for hardware-accelerated volume rendering[J]. *IEEE Trans. Vis. Comput. Graph.*, 2007, **13**(6): 1600-1607
- [8] NING P, HESSELINK L. Vector quantization for volume rendering[C]//Proceedings of the 1992 workshop on Volume visualization. New York: ACM, 1992: 69-74
- [9] SCHNEIDER J, WESTERMANN R. Compression domain volume rendering[C]//IEEE Visualization. Piscataway: IEEE, 2003: 293-300
- [10] NING P, HESSELINK L. Fast volume rendering of compressed data[C]//Proceedings Visualization'93. Piscataway: IEEE, 1993: 11-18
- [11] ZHAO Liping, XIAO Degui, LI Kenli, *et al.* An efficient algorithm for large-scale volume data compression and its application in seismic data processing[J]. *J. Comput. Aid. Desig. Comput. Graph.*, 2009, **21**(11): 1606-1611
- [12] ZHAO L P, YUE G X, XIAO D G, *et al.* A content-based classified hierarchical vector quantization algorithm for volume compression[J]. *J. Software*, 2011, **6**(2): 322
- [13] DING Z Y, TAN J G, WU X Y, *et al.* A near lossless compression domain volume rendering algorithm for floating-point time-varying volume data[J]. *J. Vis.*, 2015, **18**(2): 147-157
- [14] YU S, ZHANG S, WANG K, *et al.* An efficient and fast GPU based algorithm for visualizing large volume of 4D data from virtual heart simulations[J]. *Biomed. Signal Proces.*, 2017, **35**: 8-18
- [15] PARYS R, KNITTEL G. Giga-voxel rendering from compressed data on a display wall[J]. *J. WSCG*, 2009, **17**(1-3): 73-80
- [16] WU Z B, YU J Q. Vector quantization: a review[J]. *Front. Inform. Technol. Electron.*, 2019, **20**(4): 507-524
- [17] LINDE Y, BUZO A, GRAY R M. An algorithm for vector quantizer design[J]. *IEEE Trans. Commun.*, 1980, **28**(1): 84-95
- [18] SAWYER D M, VETTE J I. AP-8 trapped proton environment for solar maximum and solar minimum[J]. *NASA STI/Recon Technical Rep. N*, 1976, **77**: 18983