



段状管道轴向数据可视化的颜色映射函数优化方法研究与应用

罗月童, 赵东晟, 彭俊, 董子秋

引用本文

罗月童, 赵东晟, 彭俊, 董子秋. 段状管道轴向数据可视化的颜色映射函数优化方法研究与应用[J]. 计算机科学, 2024, 51(11A): 240400039-4.

LUO Yuetong, ZHAO Dongsheng, PENG Jun, DONG Ziqiu. Research and Application of Color Mapping Function Optimization Method for Segmented Pipeline Axial Data Visualization [J]. Computer Science, 2024, 51(11A): 240400039-4.

相似文章推荐 (请使用火狐或 IE 浏览器查看文章)

Similar articles recommended (Please use Firefox or IE to view the article)

[一种面向工业产品表面缺陷图像的色调增强方法](#)

Hue Augmentation Method for Industrial Product Surface Defect Images

计算机科学, 2023, 50(11A): 230200089-6. <https://doi.org/10.11896/jsjcx.230200089>

[面向单一背景的改进RetinaNet目标检测方法研究](#)

Study on Single Background Object Detection Oriented Improved-RetinaNet Model and Its Application

计算机科学, 2023, 50(7): 137-142. <https://doi.org/10.11896/jsjcx.220500066>

[基于同源控制点的边缘绑定方法](#)

Edge Bundling Method Based on Homologous Control Points

计算机科学, 2022, 49(10): 96-102. <https://doi.org/10.11896/jsjcx.220300066>

[面向小目标检测的改进RetinaNet模型及其应用](#)

Small Object Detection Oriented Improved-RetinaNet Model and Its Application

计算机科学, 2021, 48(10): 233-238. <https://doi.org/10.11896/jsjcx.200900172>

[基于历史行车轨迹集的车辆行为可视分析方法](#)

Historical Driving Track Set Based Visual Vehicle Behavior Analytic Method

计算机科学, 2021, 48(9): 86-94. <https://doi.org/10.11896/jsjcx.200900040>

段状管道轴向数据可视化的颜色映射函数优化方法研究与应用

罗月童 赵东晟 彭俊 董子秋

合肥工业大学计算机与信息学院 合肥 230009

摘要 轴向数据经常以伪色彩方式在三维管道模型上进行可视化,颜色映射函数对可视化效果有决定性影响。虽然现在已有很多颜色映射函数,且其对符合常见分布特点的数据有较好效果,但它们对分布比较特殊的数据还是难以取得理想效果,所以人们针对各种特殊分布数据研究颜色映射函数。如果三维管道轴向数据由若干段组成,并且呈现“段内差别小,段间差距大”的分布特点,那么常见映射函数难以同时表现段内的细微差异和段之间的显著差别,从而影响可视化效果。针对这个问题,提出一种基于控制点的映射函数优化方法,以改善段状数据的可视化效果。实验分析使用了合成数据来验证方法的有效性,且使用了聚变堆冷却管的辐射量数据验证方法的有效性,两种数据均验证了该方法的有效性。

关键词: 科学可视化;颜色映射;控制点;可视化优化

中图分类号 TP391.41

Research and Application of Color Mapping Function Optimization Method for Segmented Pipeline Axial Data Visualization

LUO Yuetong, ZHAO Dongsheng, PENG Jun and DONG Ziqiu

School of Computer Science and Information Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China

Abstract Axial data is often visualized in a pseudo color manner on 3D pipeline models, and the color mapping function has a decisive impact on the visualization effect. Although there are now many color mapping functions that have good effects on data that conform to common distribution characteristics, it is still difficult to achieve ideal results on data with special distributions. Therefore, people are studying color mapping functions for various special distribution data. If the axial data of a three-dimensional pipeline is composed of several segments and presents a distribution characteristic of “small differences within segments and large differences between segments”, then common mapping functions are difficult to simultaneously represent subtle differences within segments and significant differences between segments, which affects the visualization effect. To address this issue, this article proposes a mapping function optimization method based on control points to improve the visualization effect of segmented data. Experimental analysis first verifies the effectiveness of the method using synthetic data; it also verifies the effectiveness of the method using radiation data from the cooling tubes of fusion reactors, and both types of data confirm the effectiveness of this method.

Keywords Scientific visualization, Color mapping, Control points, Visualization optimization

1 引言

因为管道的特殊结构,人们常用沿管道轴线分布的数据刻画管道的特性,如温度、压力、辐射度等。将数据映射为管道模型颜色的可视化方法因具有实现简单、效果直观等特点^[1],获得了广泛应用^[2]。颜色映射函数对可视化效果有决定性影响,如图1所示的聚变堆冷却管道的可视化展示中,因为采用不同的颜色映射函数,图1(b)能直观地展现数据差异,而图1(c)却极易引起混淆。

定义颜色映射函数是科学计算可视化中的常见操作,用户通常使用可视化工具如 SciVisColor^[3] 和 ColorMeasures^[4] 选择颜色映射函数。类似的想法可以在 ColorBrewer^[5] 和 ColorCAT^[6] 中找到,这些工具可以对同一类别的数据应用类似的颜色映射设计规则。此外,一些方法利用用户指定的设

计规则来优化颜色映射。Sisneros 等^[7] 在用户定义的亮度函数的指导下,在感知均匀的 CIELUV 色彩空间中细化色图。Nunez 等^[8] 提出了一种颜色映射优化方案,通过最大化线性感知均匀性规则来解决色觉缺陷。对满足常见分布的数据,现有可视化工具能很好地满足用户需求,但对于特殊分布数据仍面临挑战,所以多个工作研究基于数据分布的映射函数优化方法^[9-11]。Schulze-Wolgast 等^[12] 基于统计元数据,如中位数、平均值或用户自定义值,调整颜色映射;Tominski 等^[13] 进一步引入了直方图均衡化方法来改善颜色编码,旨在将更多的颜色资源分配给数据密集的区域。Zeng 等^[14] 进一步把空间信息引入颜色映射函数优化问题,以更好地揭示 2D 标量场的空间模式。

管道是一类特殊的可视化场景,其轴线数据可视为 1D 数据场。作者在聚变堆冷却管的辐射剂量可视化工作中注意

基金项目:国家自然科学基金项目(61877016,61602146)

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China(61877016,61602146).

通信作者:罗月童(ytluo@hfut.edu.cn)

到:如果 1D 数据场由若干段组成,且数据段具有“段内差别小,段间差距大”的特点时,如图 1(a)所示。对于这类数据,采用一般的颜色映射策略难以体现段内的微小差别,如图 1(b)所示;而对数据进行直方图均衡化后再可视化,虽然有助于展现段内微小差异,但会模糊段间的差别,引起混淆,如图 1(c)所示。针对这类问题,本文提出一种颜色映射优化方法,保证可视化结果既能展现段内微小差异,也能体现段间的巨大差别,如图 1(d)所示。在这项工作中,本文的主要贡献如下。

- 1)凝练问题:整理出“段间差距大,段内差距小”的段状数据的颜色映射问题,指出它面临的挑战。
- 2)提出方法:提出了一种新的可视化优化方法来自动调整颜色映射,以揭示数据的差异。
- 3)验证结果:通过合成案例与核聚变真实数据案例证明了本文方法的有效性。

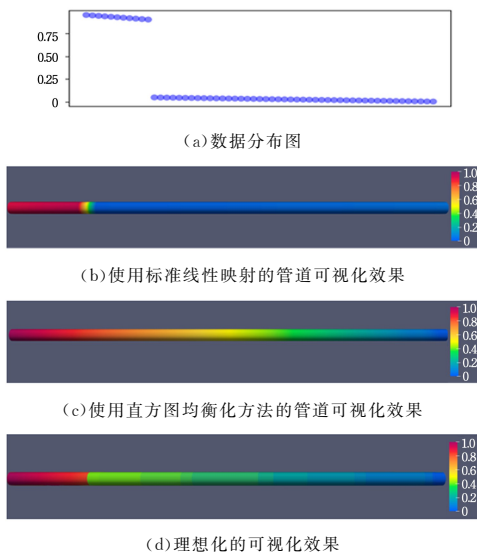


图 1 管道内的 1D 数据与可视化效果

Fig. 1 1D data and visualization effects in the pipeline

2 需求分析

本文所研究问题来源于管道轴线数据的可视化工作,其数据本质上是 1D 标量数据。本文研究具有下述特点的 1D 标量数据的颜色映射问题。

- 1)宏观上,1D 数据由若干“段”组成;
- 2)“段”与“段”之间有显著差异;
- 3)“段”的内部也有差异,但不明显。

因为数据由若干“段”组成,所以本文称之为“段状”数据。因为特点 2)和 3)给颜色映射带来相互矛盾的要求,直接采用标准颜色映射函数难以有效展示数据特征,手工调整颜色函数则过于繁琐,所以本文针对这个问题研究颜色映射函数优化方法,其需要满足下述需求。

R1:自动化颜色映射调整以揭示所有数据特征。为了避免手动调整颜色映射的繁琐和耗时,应提供自动化工具,使用户能够快速、准确地揭示数据中的隐含特征。自动化调整不仅能提高效率,其结果还能基于数据揭示标准线性映射下不可见的特征。

R2:可视化能够展示数据段内部的差异。鉴于这些段的

内部数据通常数值接近,需要设计的可视化技术能够增强这些内部差异的表现,使得观察者能够轻松区分细微的变化,从而更深入地理解数据内部结构。

R3:可视化能够保持数据段之间的差异。可视化应强调不同段之间的差异,在颜色映射的调整中保持或强化这些差异,以便于观察者识别和分析不同区域。这对于揭示和理解复杂数据集的整体结构至关重要。

3 前置知识:颜色映射函数

管道中的“段”都是由若干数据组成的集合,这里不妨称之为数据段;管道中的 1D 数据场可以视为由若干数据段 s_i 组成的集合 $S = \{s_1, s_2, \dots, s_m\}$, s_i 由若干数据组成。不失一般性,本文规定数据 $v \in [0, 1]$ 。在此基础上,首先在 RGB 颜色空间定义颜色图谱 $C = (c_1, c_2, \dots, c_n)$,然后基于控制点集 $P = \{(v_1, c_1), (v_2, c_2), \dots, (v_n, c_n)\}$ 定义分段线性颜色映射函数,其中 v_i 单调递增,即 $v_1 < v_2 < \dots < v_n$ 。本文采用文献[15]中的颜色线性插值算法,具体颜色映射函数如下:

$$\hat{c} = \frac{c_i - c_{i-1}}{v_i - v_{i-1}} \times (\hat{v} - v_{i-1}) + c_{i-1} \quad (v_{i-1} < \hat{v} < v_i, 1 \leq i \leq n) \quad (1)$$

在指定颜色图谱 $C = (c_1, c_2, \dots, c_n)$ 的前提下,颜色映射函数由 $P_V = (v_1, v_2, \dots, v_n)$ 确定,因此颜色映射可表示为 $c = f(C, P_V, v)$ 。本文即通过调整 $P_V = (v_1, v_2, \dots, v_n)$ 优化颜色映射函数,用 $v_i = \frac{i-1}{n-1} \times i$ 作为 P_V 的初始值。图 2 展示了优化前和优化后的颜色映射函数及对应的可视化结果。通过优化方法最终得到一个颜色映射函数,所有数据均通过其被映射为某种颜色,相同数值在同一规则下会被映射为同一颜色。在确定好颜色映射函数的情况下,就等同于为可视化数据集确立了一套颜色映射规则,所有数据均可被映射为具体的颜色。

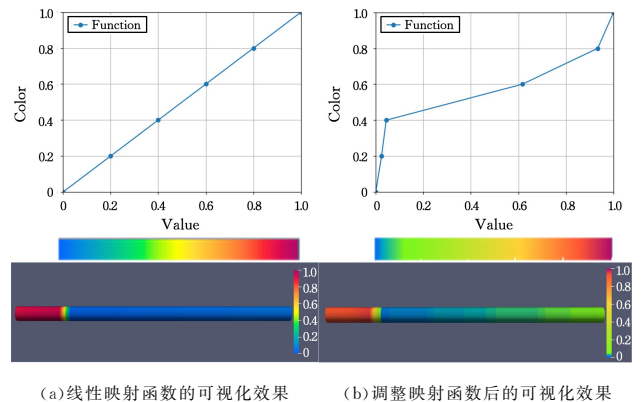


图 2 调整前后的颜色映射函数与可视化效果对比

Fig. 2 Comparison of color mapping functions and visualization effects before and after adjustment

4 颜色映射函数优化

根据前置知识以及需求 R1—R3,给出颜色映射函数优化问题的定义如下:给定包含 m 个数据段的 1D 数据 $S = (s_1, s_2, \dots, s_m)$ 及优化颜色映射函数 $c = f(C, P_V, v)$,使得基于 $c = f(C, P_V, v)$ 的可视化结果既能体现 s_i 内部的细微变化,也能

刻画 s_i 和 s_j 之间的差异,其中优化变量为控制点 P_V 。

本文将颜色映射函数优化问题转化为了非线性约束优化问题。具体来说便是寻求 P_V ,使得目标函数 $E(s, P_V)$ 的值最小:

$$\arg \min_{P_V} E(S, P_V) = V(S, P_V) + \alpha \times D(S, P_V) \quad (2)$$

其中,段内变化可见项 $V(S, P_V)$ 刻画段内变化的可见性,段间差异保持项 $D(S, P_V)$ 表示段间差异的区分度,参数 α 调节两项之间的权重。

在具体的实现过程中,本文使用求解非线性约束优化问题的算法自动求解出目标函数最小值情况下的 P_V ,约束条件为 P_V 情况下为各段分配的颜色空间之和不超过颜色图谱的范围。

4.1 段内变化可见项 $V(S, P_V)$

需求 R2 要求提高段内细微变化的可见性,本文方法尽量给数据段分配尽量多的颜色空间,同时不同数据段之间满足以下条件。

- 1)范围原则:数据段 s 的波动范围越大,为其分配的颜色空间越大。
- 2)尺度原则:数据段 s 越长,为其分配的颜色空间越大。
- 3)限原则:数据段 s 的颜色空间有限,即无论数据段 s 的范围和尺度多大,其颜色空间都有限。

依据上述原则,本文定义段内变化可见项 $V(S, P_V)$ 如下:

$$V(S, P_V) = \sum_{s_i \in S} \frac{\text{sig}[\text{range}(s_i) \times \text{len}(s_i)]}{\text{range}[c(s_i)]} \quad (3)$$

$$\text{s. t. } \sum_{s_i \in S} \text{range}[c(s_i)] \leq 1$$

其中, $\text{range}(s)$ 和 $\text{len}(s)$ 分别表示数据段 s 的数据范围和长度。 $c(s)$ 表示分配的颜色空间, $\text{range}[c(s)]$ 则表示颜色空间的范围。 $\text{sig}(\cdot)$ 表示 sigmod 函数,用来满足“有限原则”。由拉格朗日乘数定理可知,当 $\forall s_i \rightarrow \frac{\text{sig}[\text{range}(s_i) \times \text{len}(s_i)]}{\text{range}[c(s_i)]} = k$ 成立时, $V(S, P_V)$ 的取值最小,则正好满足“范围原则”和“尺度原则”,其中 k 为某个常数。

4.2 段间差异保持项 $D(S, P_V)$

需求 R3 要求优化映射函数后仍能察觉数据段之间的差异,即不同数据段的颜色空间之间要有足够的距离,因此颜色分配要符合以下原则。

1)距离原则:如果数据段 s_i 和 s_j 存在距离,距离越大,那么其对应的颜色空间 $c(s_i)$ 和 $c(s_j)$ 的距离也越大。两个区间之间的距离定义如下:

$$d(s_i, s_j) = \begin{cases} \min(s_j) - \max(s_i), & \min(s_i) \leq \min(s_j) \\ \min(s_i) - \max(s_j), & \min(s_i) > \min(s_j) \end{cases} \quad (4)$$

2)有限原则:数据段之间的颜色差异不要超过一定的限度,避免占用过多颜色空间,影响其他数据段的颜色分配。

依据“距离原则”和“有限原则”,段间差异保持项 $D(S, P_V)$ 的定义如下:

$$D(S, P_V) = \sum_{s_i, s_j \in S, i < j} \frac{\text{sig}[d(s_i, s_j)]}{d[c(s_i), c(s_j)]} \quad (5)$$

同样根据拉格朗日乘数定理可知, $\forall i, j \rightarrow \frac{\text{sig}[d(s_i, s_j)]}{d[c(s_i), c(s_j)]} = k$ 时, $D(S, P_V)$ 的取值最小,也正好符合

“距离原则”。 sigmod 函数 $\text{sig}[d(s_i, s_j)]$ 防止差距大的颜色段之间占据过多颜色空间,从而保证优化结果符合“有限原则”。

5 实验分析

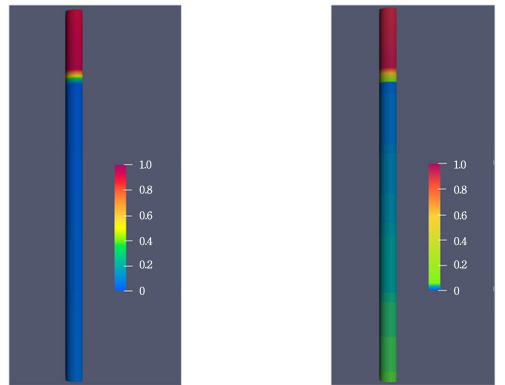
本文方法已在聚变堆冷却管道可视化系统中获得应用,该系统采用 C++ 编写,基于 VTK 进行可视化,使用 AlgLib 工具包实现颜色映射函数优化。为展现方法的有效性,在配备 16GB 内存与 i7-8700(3.2GHz CPU)处理器的计算机上进行测试,测试中使用了“合成案例”和“真实案例”两种案例。

5.1 合成案例

这里使用了自制的分段数据进行测试,数据分布如图 3(a)所示。最初使用彩虹色调进行线性颜色映射,可视化结果显示上下两段虽然颜色有所区别,但其内部差异并不显著,肉眼难以明确区分,如图 3(b)所示。然而应用算法进行调整后,可视化结果如图 3(c)所示,内部颜色差异变得尤为明显且呈现出渐变趋势。这种结果不仅揭示了数据间的细微差异,还清晰地区分了上下两个数据段的差异。



(a)合成数据分布图



(b)线性映射下的可视化效果

(c)优化后的可视化效果

图3 合成案例示例图

Fig. 3 Example diagram of synthetic case

5.2 真实案例

该案例是核聚变冷却管道的放射性核素辐射量分布数据,其中一部分的数据分布如图 4 所示。图中数据明显分为两段,两段之间的差异很大,段内数据虽有变化,但变化不大。

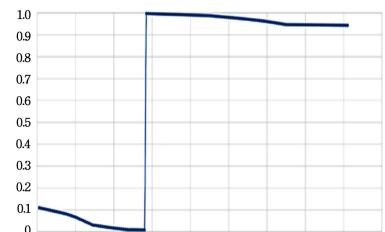
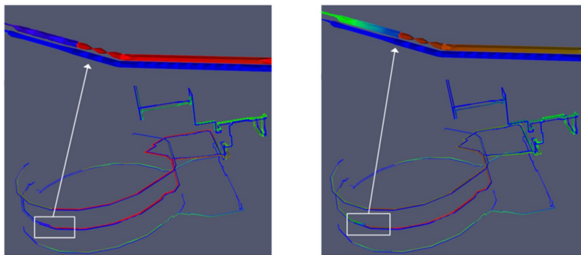


图4 冷却管道辐射量数据分布图

Fig. 4 Data distribution diagram of radiation amount of cooling pipeline

如果采用初始的线性颜色映射函数,则可获得如图 5(a)所示的可视化结果。在白色矩形所标注区域中,其上部管道中的数据如图 4 所示,虽然两段内部的数据有变化,但在可视化结果中难以观察到,而且上部管道的左侧部分和下部管道非常相似,虽然实际上它们之间有差异。这样的可视化结果不利于科研人员掌握数据的分布规律。



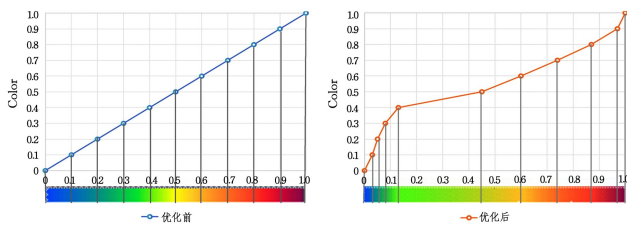
(a) 初始颜色映射函数下的
可视化效果

(b) 优化后的的可视化效果

图 5 聚变真实案例示例图

Fig. 5 Example diagram of fusion real case

采用本文方法优化颜色映射函数的过程如图 6 所示,其对应的可视化结果如图 5(b)所示。在图 5(b)中,可以清楚地观察到原本区域中管道内部辐射量数据的变化趋势。



(a) 优化前的颜色映射函数

(b) 优化后的颜色映射函数

图 6 聚变真实案例颜色映射函数调整过程

Fig. 6 Color mapping function adjustment process of fusion real case

特别是在图 5(b)中冷却管道模型左右两侧的管道颜色呈现逐渐过渡趋势,因此可以推断左右两部分管道内辐射量均是逐渐减少的趋势,这与数据分布规律相符合,既展示了传统可视化方法难以捕捉的细节,又使得两部分管道呈现出明显的颜色区分,避免了混淆。

结束语 颜色映射函数对可视化结果的质量有重要影响,手工设置颜色映射函数不仅依赖经验,而且费时费力,所以颜色映射函数优化一直是重要的研究课题。本文观察到管状数据可视化中的一个难题:如果数据由若干段组成,且数据段具有“段内变化小,段间差距大”的特点,那么设置合理的数据映射函数非常困难。针对这个难题,本文提出一种颜色映射函数优化方法,将颜色映射函数优化问题转换为非线性约束优化问题,通过定义合理的目标函数,自动生成合适的颜色映射函数,使得在可视化结果中既能观察到段内的微小变化,也能清晰保留段之间的差异,极大地提升了可视化效果。合成案例和真实案例都展示了本文方法的有效性。

本文主要聚焦于管道这一类特殊的可视化场景,在后续工作中会考虑应用到更多大型工业场景中。本文用颜色空间的大小衡量区分度,而事实上感知性能更好衡量区分度,未来将研究基于用户感知的颜色优化方法。另外,本文的方法可以扩展到块状的二维数据或三维数据,这也是值得进一步研究的方向。

参考文献

- [1] WARE C. Color sequences for univariate maps: Theory, experiments and principles[J]. IEEE Computer Graphics and Applications, 1988, 8(5): 41-49.
- [2] ROGOWITZ B E, TREINISH L A, BRYSON S. How not to lie with visualization[J]. Computers in physics, 1996, 10(3): 268-273.
- [3] SAMSEL F, WOLFRAM P, BARES A, et al. Colormapping resources and strategies for organized intuitive environmental visualization[J]. Environmental Earth Sciences, 2019, 78: 1-12.
- [4] BUJACK R, TURTON T L, SAMSEL F, et al. The good, the bad, and the ugly: A theoretical framework for the assessment of continuous colormaps[J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2017, 24(1): 923-933.
- [5] BREWER C A. Color use guidelines for mapping [J]. Visualization in modern cartography, 1994, 1(7): 123-148.
- [6] MITTELSTÄDT S, JÄCKLE D, STOFFEL F, et al. Colorcat: Guided design of colormaps for combined analysis tasks [C]// Eurographics Conference on Visualization (Eurovis), 2015.
- [7] SISNEROS R, RAJI M, VAN MOER M W, et al. Chasing rainbows: A color-theoretic framework for improving and preserving bad colormaps [C]// ISVC. Las Vegas, NV, USA, 2016: 391-402.
- [8] NUÑEZ J R, ANDERTON C R, RENSLow R S. Optimizing colormaps with consideration for color vision deficiency to enable accurate interpretation of scientific data [J]. PloS one, 2018, 13(7): 199-213.
- [9] SILVA S, SANTOS B S, MADEIRA J. Using color in visualization: A survey [J]. Computers & Graphics, 2011, 35(2): 320-333.
- [10] BERNARD J, STEIGER M, MITTELSTÄDT S, et al. A survey and task-based quality assessment of static 2D colormaps [C]// Visualization and Data Analysis 2015. SPIE, 2015: 247-262.
- [11] ZHOU L, HANSEN C D. A survey of colormaps in visualization [J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2015, 22(8): 2051-2069.
- [12] SCHULZE-WOLLGAST P, TOMINSKI C, SCHUMANN H. Enhancing visual exploration by appropriate color coding [C]// International Conference in Central Europe on Computer Graphics and Visualization, 2005: 203-210.
- [13] TOMINSKI C, FUCHS G, SCHUMANN H. Task-driven color coding [C]// 2008 12th International Conference Information Visualisation. IEEE, 2008: 373-380.
- [14] ZENG Q, WANG Y, ZHANG J, et al. Data-driven colormap optimization for 2d scalar field visualization [C]// 2019 IEEE Visualization Conference (VIS). IEEE, 2019: 266-270.
- [15] PHILLIPS G M. Interpolation and approximation by polynomials [M]. Springer Science & Business Media, 2006.



LUO Yuetong, born in 1978, Ph.D, professor, is a member of CCF (No. 17933M). His main research interests include data visualization, computer-aided design, and computer graphics.