

面向调色板设计的感知一致色彩排序方法

肖志雄^{1,2)}, 许文松¹⁾, 曾琼^{1)*}

¹⁾(山东大学计算机科学与技术学院 青岛 266000)

²⁾(大连海事大学信息科学技术学院 大连 116026)

(qiong.zn@sdu.edu.cn)

摘要: 针对可视化设计中调色板选择涉及的大量视觉比较操作,为了提升色彩设计效率,提出一种符合感知的调色板色彩排序方法。首先建立由全局有序性以及视觉连贯性约束因子组成的色彩排序能量优化方程,并通过粒子群算法对其进行求解以获得感知一致的色彩排序;在此基础上,开发了一个基于感知一致色彩排序的调色板设计系统,可以支持调色板选取、调色板全局探索、基于样例的调色板检索等功能。利用定量度量和用户实验对所提方法在感知一致性及调色板比较任务上进行实验,结果表明,该方法可以生成符合感知的调色板色彩排序结果,能有效地促进调色板相似性比较的准确性及效率。

关键词: 数据可视化; 色彩设计; 自动色彩优化

中图法分类号: TP391.41 DOI: 10.3724/SP.J.1089.2024.19879

Perceptually Driven Color Ordering for Palette Design

Xiao Zhixiong^{1,2)}, Xu Wensong¹⁾, and Zeng Qiong^{1)*}

¹⁾(School of Computer Science and Technology, Shandong University, Qingdao 266000)

²⁾(Information Science and Technology College, Dalian Maritime University, Dalian 116026)

Abstract: color palette design plays a significant role in visualization for data understanding. To design and select an appropriate color palette, users need to visually compare various color palettes. However, the difficulty of the visual comparison among palettes becomes extremely severe with an increasing number of color palettes and colors. Existing research in color perception reveals that color palette with well-ordered colors can improve the efficiency of visual comparison. Inspired from this finding, we propose an automatic color palette ordering method for color palette design. Specifically, we propose a color ordering optimization equation under the constraints of global order and visual continuity between colors. Based on the color ordering approach, we develop a color design system, which enables efficient color palette selection, global color palette exploration and color palette retrieval. We conduct quantitative experiments and user studies to evaluate the perceptual consistency of our method and its advantages in the palette comparison task.

Key words: data visualization; color palette design; automatic color ordering

调色板是由一系列离散色彩块组成的序列集合,在数据可视化中,调色板常用来编码类别数

据,通过将调色板中的色彩分配给不同类别的数据,可生成视觉信息丰富的图表。调色板设计的过

收稿日期: 2022-07-30; 修回日期: 2022-11-01. 基金项目: 国家重点研发计划(2021YFB1715900); 山东省自然科学基金(ZR2021MF102). 肖志雄(1999—),男,硕士研究生,主要研究方向为数据分析及向量检索;许文松(2002—),男,在校学生,主要研究方向为数据可视化;曾琼(1987—),女,博士,副教授,硕士生导师,CCF会员,论文通信作者,主要研究方向为数据可视化、计算机图形学。

程既涉及色彩的选取与组合^[1-3], 也包含色彩的分配^[4]; 调色板设计的好坏影响着用户对数据的理解效率^[1,4]. 为了降低用户设计调色板的难度, 已有大量的研究探索了调色板自动生成与分配方法; 此外, 现有可视化工具(如 ColorBrewer^[5], Python Matplotlib 等)中提供了丰富的待选调色板, 并自动分配色彩.

为了从调色板数据集中选择合适的调色板, 用户需要进行大量的视觉比较操作, 而调色板视觉比较的难度随着调色板数量和长度的增加而变大. 相关研究表明, 视觉上排列有序的色彩表有助于提高调色板比较的效率^[6-7]. 已有一些调色板自动排序方法, 如 Phan 等^[8]基于分治策略和语义相关性调整色彩顺序; Kim 等^[9]利用旅行商算子求解色彩顺序, 使相邻色彩间的色相及亮度变化尽可能平滑. 然而, 这些方法难以获得在全局以及局部上均符合用户有序性感知的调色板序列.

针对上述问题, 本文提出一种感知一致的调色板色彩排序方法, 通过引入符合用户感知的色彩有序性约束因子, 生成符合视觉有序的调色板. 首先建立融合全局有序性以及局部视觉连贯性等约束因子的能量优化方程, 用于指导生成排列有序且感知连续的色彩序列, 该方程可通过粒子群优化(particle swarm optimization, PSO)算法进行优化求解. 在此基础上, 开发了一个基于感知一致色彩排序的调色板设计系统, 旨在帮助可视化人员高效地设计调色板, 可支持调色板选取、调色板全局探索及基于样例的调色板检索等功能.

本文在 Kim 等^[9]提出的 FM100P, KHTP, LHSP 等公开数据集上, 与同类方法进行定量度量和用户调查, 评估本文色彩排序方法在感知一致性及调色板比较任务中的有效性. 实验结果表明, 本文方法可产生符合感知的调色板色彩排序, 并能有效地提升调色板相似性比较的准确性及效率.

1 相关工作

1.1 调色板设计

调色板是数据可视化中色彩编码的重要表达方式, 为了避免视觉混淆, 通常由少于 10 种的离散色彩构成^[6,10]. 调色板设计涉及不同色彩的组合及分配, 设计过程较为烦琐. 为了提高调色板设计效率, 研究人员在调色板自动生成和分配、基于图像的调色板自动提取等方面开展了一系列工作.

调色板自动生成方法通常基于色彩间的可辨别

性、色彩美观性等因素从色彩空间选取颜色^[11-12], 该过程不考虑如何将色彩分配映射至数据中. 与此不同, 色彩分配方法关注于利用色彩属性(如语义和颜色空间位置)、数据特征等因素将颜色映射至不同的数值^[1,13]. Lu 等^[11]将色彩分配引入调色板生成的过程中, 基于点区分度、色彩名称差异及色彩差异等属性设计优化方程, 使设计的调色板能够达到较优视觉区分度. 另一方面, 基于图像的调色板提取方法能够自动地选择图像中有代表性的色彩, 生成与其风格一致的调色板. 此类方法的核心是对图像中的色彩进行聚类, 还有部分方法在聚类过程中引入语义、情感和注意力等约束^[14-18]. 然而, 基于图像的调色板提取多应用于图像重着色、图形设计等方向, 未考虑数据等因素对于视觉效果的影响.

除了上述自动调色板计算方法, 交互式调色板设计系统也受到科研人员的关注. 部分调色板设计系统中内置了丰富的调色板供用户选择, 如 ColorBrewer^[5]内置了一系列不同长度的调色板, 并提供数据类别、数据属性、应用环境、用户属性和可视化样例等参数控制调色板设计过程. 此外, 部分调色板交互式设计系统结合社区排名^[19]或图像^[20], 帮助用户提高调色板设计效率. 但随着内置调色板的增多, 让用户了解调色板之间的关联并进行高效选择仍然十分具有挑战性.

1.2 调色板相似性计算

相似性比较是调色板设计的基础, 通常由不同调色板色彩距离进行度量, 色彩距离则用色彩空间的欧几里得距离或者感知距离计算^[14,21-22], 匹配不同调色板之间的色彩对应关系是目前调色板相似性计算中的主要问题. Pan 等^[21]提出单色差模型、均值色差模型及最小色差模型等方式计算相似性, 通过单色表达、均值和最小距离匹配不同调色板中的色彩; 此外, 最小二分图匹配^[14]、测地距离^[22]等方法也在调色板相似性计算中得到应用.

上述相似性计算将调色板看作是一系列无序色彩的组合, 但研究表明, 人们在比较调色板相似性的过程中受到了色彩顺序的影响. Yang 等^[6]针对含有 5 种色彩的调色板开展研究, 评估了最小色差模型和均值色差模型 2 种调色板比较计算模型在不同色彩距离度量下的表现, 发现调色板中色彩的排序影响相似性感知; 进一步, Wu 等^[7]通过定性实验证明了色彩有序性对于调色板相似性感知的影响; 受到上述工作的启发, Kim 等^[9]提出一种基于动态最近邻色彩规划的相似性计算方法, 将

不同调色板中的色彩投影到同一有序空间，计算该空间中调色板各色彩块与另一调色板色彩序列之间的差异，进一步验证了有序性对于相似性计算的重要性。

1.3 调色板排序

调色板排序指通过调整色板中各种色彩的位置，使其尽可能地符合预定义的顺序规律，该规律在不同的应用中存在差异。例如，按照色度优先原则，Schoeffmann 等^[23]利用字典排序法在 HSV 色彩空间中对调色板进行排序；基于“语义相关的调色板应尽可能保持一致的色彩顺序”这一有序性定义，Phan 等^[8]利用分治策略提出一种二分排序方法 (binary palette sorting, BPS)，并将其应用于大规模数据集的调色板插值及预测。然而，数据可视化的目的是帮助用户高效地理解数据，仅有色度优先或者语义相关性无法帮助人们理解数据之间的顺序关系。Kim 等^[9]提出动态最近邻色彩规划相似性计算方法，将色彩之间的顺序定义为相邻色彩间具有尽可能平滑的色相和亮度变化，把色彩排序问题转化为旅行商问题进行求解，并分别针对单调色板排序(single palette sorting, SPS)和多调色板排序(palette pair sorting, PPS)提供求解策略；但该方法核心是计算局部平滑的色彩变化，难以反映全局的有序信息。

有序性的感知是一个复杂的过程，色彩的全局或局部、有向或无向都影响着人们对顺序关系的理解，色彩感知与认知领域的研究人员针对有序性进行了大量的探索^[24-27]。其中，Bujack 等^[26]归纳总结了色彩感知理论中对于有序性的定义，并根据不同的有序性定义建立数学度量。目前，尚没有将有序性感知理论引入调色板自动色彩排序的方法，本文将融合有序性度量对调色板排序。

2 感知驱动的色彩排序

色彩有序性是色彩设计中的重要感知属性，影响人们对信息的理解与记忆。理想情况下，当任何观察者都能以同样的方式对色彩设计中的任意色彩序列进行排序时，则该色彩设计满足有序性^[26,28]。本文认为，在面向数据可视化的应用中，排列有序的调色板应尽可能地使得色彩序列符合数值递增或者递减的规律——即使在不提供图例说明的情况下，用户也能快速地建立色彩与数值之间的映射关系。为了达到这一目标，本文定义色彩自动排序过程中应遵循的设计需求如下：

R1. 调色板中的任意 2 个色彩不能完全一致，以确保色彩与数值之间的一一映射^[26]。

R2. 调色板中相邻色彩间视觉差异应尽可能小，以降低由于调色板中色彩变化过大而导致的数值感知突变^[26]。

R3. PPS 尽可能地满足不同调色板间的一致性，支持多调色板的视觉比较操作^[9]。

2.1 问题定义

基于上述设计需求，本文提出利用色彩全局有序性度量、局部视觉连贯性等约束建立优化方程，且该方程可适用于 PPS。

给定初始调色板 \mathbf{P} ，该调色板包含 n 种 CIELAB 色彩空间的三维色彩 $\mathbf{c}(t)$ ，其中， $t \in \{1, 2, \dots, n\}$ 表示调色板从左到右的位置索引。由此，初始调色板 \mathbf{P} 可表示为 $\mathbf{P} = \{\mathbf{c}(1), \mathbf{c}(2), \dots, \mathbf{c}(n)\}$ 。本文的目标是获得一组新的位置索引 $\tilde{t} = \{\tilde{t}_1, \tilde{t}_2, \dots, \tilde{t}_n\}$ ，该索引可对调色板 \mathbf{P} 中的色彩进行重排序，生成调色板 $\tilde{\mathbf{P}} = \{\mathbf{c}(\tilde{t}_1), \mathbf{c}(\tilde{t}_2), \dots, \mathbf{c}(\tilde{t}_n)\}$ 。本文将基于单个调色板阐述算法及求解过程，该方法可直接拓展至 PPS。根据 R1 和 R2，排序后的调色板既要满足全局有序性要求，也需要保证色彩之间的局部视觉连贯性，该过程可表达为能量优化方程

$$\arg \min_{\tilde{t}} \mathbf{E}(\tilde{t} | \mathbf{P}) = \alpha \mathbf{E}_1(\tilde{t} | \mathbf{P}) + \mathbf{E}_2(\tilde{t} | \mathbf{P}) \quad (1)$$

其中， $\mathbf{E}_1(\tilde{t} | \mathbf{P})$ 表示全局有序性约束； $\mathbf{E}_2(\tilde{t} | \mathbf{P})$ 表示局部视觉连贯性约束； α 表示两者的权重，用于平衡 2 个约束项之间的矛盾，其数值设置详见第 2.4 节。

2.2 色彩排序约束算子

(1) 全局有序性约束。Bujack 等^[26]将基于图例的有序性定义为色彩之间的可逆性，目的是保证色彩与数据之间的一一对应^[29]。当色彩在调色板的各个位置只出现一次时，则该色板全局可逆。当且仅当色彩序列全局可逆时，用户才能够在给定图例的情况下获得全局有序性感知，而这种感知随着色彩间的差异增大更为明显。因此，全局有序性约束可采用最小色彩变化速度进行度量，公式为

$$\mathbf{E}_1(\tilde{t} | \mathbf{P}) = - \min_{i \neq j \in \{1, \dots, n\}} \frac{\Delta E(\mathbf{c}(\tilde{t}_i), \mathbf{c}(\tilde{t}_j))}{|i - j|} \quad (2)$$

其中， $\Delta E(\mathbf{c}_i, \mathbf{c}_j)$ 表示 CIELAB 色彩空间欧几里得距离。

(2) 视觉连贯性约束。相邻色彩间的差异越小，则视觉连贯性越强。色彩间的差异可通过色彩可见性度量，通常用调色板的平均相邻色彩距离

进行计算^[26]. 为了避免产生相邻色彩间的跳跃性过渡, 本文同时最小化调色板的最大相邻色彩距离, 公式为

$$\begin{aligned} E_2(\tilde{\tau} | \mathbf{P}) = & \beta \operatorname{avg}_{i \neq j \in \{1, \dots, n\}} \Delta E(c(\tilde{\tau}_i), c(\tilde{\tau}_j)) + \\ & \gamma \max_{i \neq j \in \{1, \dots, n\}} \Delta E(c(\tilde{\tau}_i), c(\tilde{\tau}_j)) \end{aligned} \quad (3)$$

其中, β 和 γ 表示权重因子, 更多讨论见第 2.4 节.

上述方法基于单调色板描述. 对于 PPS, 本文首先将多调色板中的色彩置于同一色彩集合中, 组成新的单调色板; 经上述 SPS 处理之后, 再分置于相应调色板中.

2.3 优化求解

本文提出的能量方程使用启发式优化算法进行求解, 如模拟退火(simulated annealing, SA)算法、遗传算法(genetic algorithm, GA)、蚁群优化(ant colony optimization, ACO)算法和 PSO 算法. 本文对不同启发式算法在 FM100P-k15 数据集^[9]上的排序准确率(success rate, SR)进行实验, 该数据集包含 100 个长度为 15 的调色板, 结果如表 1 所示. 可以看出, 与其他算法相比, PSO 算法具有明显的优势, 且该算法所需调节的参数少、收敛速度快, 适合求解离散组合优化问题. 因此, 本文采用 PSO 算法进行求解.

表 1 4 种优化算法在 FM100P-k15 上的 SR 对比

优化算法	SR
SA ^[30]	0.580
GA ^[31]	0.550
ACO ^[32]	0.180
PSO ^[33]	1.000

本文实现的 PSO 算法步骤如下:

- Step1. 随机初始化 $\tilde{\tau}_0$.
- Step2. 通过式(1)计算 $E(\tilde{\tau}_0 | \mathbf{P})$.
- Step3. 最优解初始化为 $\tilde{\tau}_{\text{best}} = \tilde{\tau}_0$.
- Step4. 当 $i < I_{\text{max}}$ 时执行如下操作:
 - Step4.1. 更新 $\tilde{\tau}_{i-1}$ 得到 $\tilde{\tau}_i$;

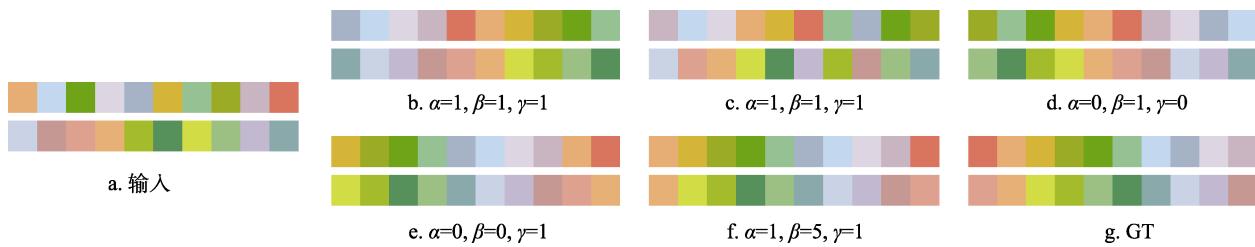


图 1 不同参数下本文方法对 2 个调色板联合排序时的结果

Step4.2. 通过式(1)计算 $E(\tilde{\tau}_i | \mathbf{P})$;

Step4.3. 当 $E(\tilde{\tau}_i | \mathbf{P}) < E(\tilde{\tau}_{\text{best}} | \mathbf{P})$ 时, $\tilde{\tau}_{\text{best}} = \tilde{\tau}_i$.

本文在应用上述 PSO 算法时, 粒子群中的粒子个数等于色板中颜色数量乘以 7.5, 粒子个体学习因子设置为 0.1, 粒子社会学习因子设置为 0.1, 速度惯性权重设置为 0.8, 迭代次数设置为色板长度的 30 倍; 上述参数适用于本文实验中的所有结果.

2.4 参数分析

本文方法涉及的可调参数主要是能量优化方程中的各项系数, 本节讨论不同系数参数设置对算法结果的影响.

式(1)中, α 用于权衡全局有序性约束, 该值越大, 则调色板中色彩更可逆, 即更易于让人感知到全局有序性, 但相对而言, 此时色彩间的差异也更大. 式(3)中, β 和 γ 用于权衡视觉连贯性约束, 其中, β 作用于平均相邻色彩距离, 该值越大则调色板间色彩的平均差异越小, 但可能产生局部差异较大的色彩; γ 用于权衡最大相邻色彩距离, 该值越大则色彩差异的最大值越小.

本文在 PPS 上对不同参数的表现进行实验, 结果表明, 当仅有全局有序性约束时能够获得较高的全局可逆性, 导致邻近色排列较为分散, 如图 1c 所示; 当仅有 β 或者 γ 时, 能够获得较为连贯的局部视觉感知, 但是整体排序较为混乱, 如图 1d 和图 1e 所示; 当 β 值约为 α 和 γ 的 5 倍时, 能够获得接近如图 1g 所示的真实标注(ground truth, GT)的排序, 如图 1f 所示. 因此, 本文所有结果均是在图 1f 的参数组合下计算的.

3 基于色彩排序的调色板设计系统

基于本文提出的感知一致色彩排序方法开发了一个调色板设计系统, 包括输入视图、全局探索视图、样例可视化视图、相似性检索视图和历史视图模块, 该系统的界面如图 2 所示.

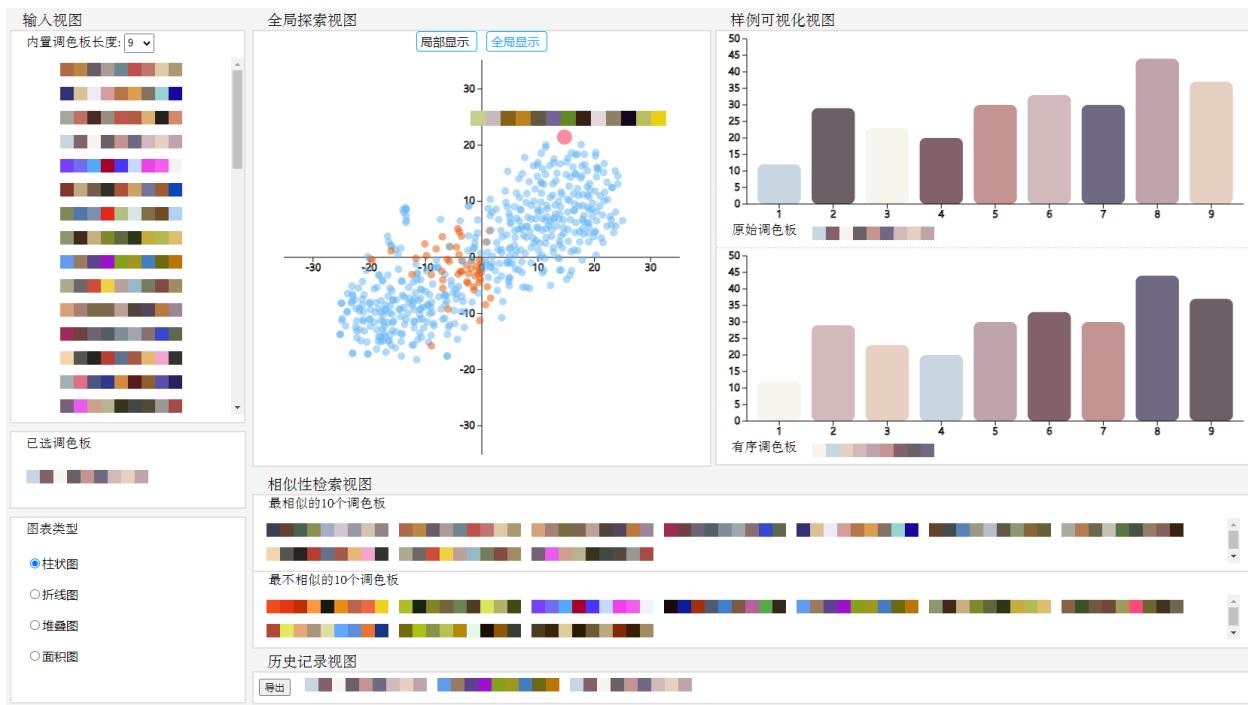


图 2 本文系统界面

(1) 输入视图. 该视图包含内置调色板、已选调色板和图表类型 3 个子视图. 其中, 内置调色板子视图中包含共 500 个内置调色板, 按照调色板长度的差异进行归类, 每个长度下包含 50 个调色板, 用户可通过选择调色板中的色板长度浏览相应内置调色板并选择; 已选调色板子视图用于展示用户当前所选择调色板; 图表类型子视图包含柱状图、折线图、堆叠图和面积图 4 种常见的可视化表达, 可以帮助用户快速查看调色板编码效果.

(2) 全局探索视图. 利用 t-SNE 算法^[34]对内置调色板进行空间分布, 使得相似的调色板在空间上距离更接近, 用户可以通过该视图快速地了解所选取的调色板与数据集中其他调色板之间的相似程度. 该视图提供局部显示和全局显示 2 种模式: 局部显示模型下, 系统仅对当前长度的调色板集合进行 t-SNE 可视化; 全局显示模型下, 对所有调色板统一计算 t-SNE 分布. 在全局显示模式下, 橙色点表示当前长度的调色板, 蓝色点表示数据集中其他长度的调色板, 用户可以通过鼠标点选查看任意 t-SNE 空间点所示意的调色板.

(3) 样例可视化视图. 展示用户选择的调色板和图表类型对应的可视化结果, 其中的色彩分配遵循“dark-is-more”感知偏差理论^[35-36], 将调色板中亮度高的颜色分配给数值(或数值变化)较小的类别、亮度低的色彩分配给数值(或数值变化)较大

的类别. 该视图允许同时查看原始调色板和有序调色板所对应的可视化, 其中, 原始调色板为数据集中的初始状态, 有序调色板为本文方法排序之后的结果. 可以看出, 有序分布的调色板更容易让人联想到各类别数据的数值, 从而直观地理解类别数据之间的大小关系.

(4) 相似性检索视图. 包含相似性检索和不相似性检索 2 个子视图, 分别显示相同长度调色板数据集中与当前所选调色板最为相似或不相似的 10 个调色板. 在计算调色板相似性的过程中, 首先利用本文方法获取排序后的调色板, 然后采用 Kim 等^[9]使用的动态规划方法计算相似性. 进一步, 用户可点击本视图中任意调色板进行探索, 已选调色板、调色板全局探索、历史记录等将自动更新.

(5) 历史记录视图. 呈现用户所选择的历史调色板, 通过回溯历史调色板, 用户可以快速地选择并导出调色板.

4 实验与结果分析

本文方法基于 Python 实现, 并基于 JavaScript 实现本文系统. 在配置为 Intel Core i7-11800H 2.3 GHz GPU, 16 GB 内存的计算机上完成定量分析实验. 本节首先在公开数据集上与同类方法对比, 通过定量分析和用户实验评估本文方法有效

性, 并分析色彩排序对调色板相似性比较任务的影响.

4.1 色彩排序定量分析

在单调色板、多调色板数据集上, 通过与同类方法进行定量分析, 评估本文方法的有效性.

4.1.1 SPS 定量分析

(1) 数据集. 本文采用 Kim 等^[9]提出的 FM100P 数据集进行 SPS 的评估. 该数据集通过从有序数据集 FM100HT 数据集^[37]中提取色彩序列子集而得到, 包含长度为 10, 15, 20, 25, 30, 35 和 40 的调色板各 100 个, 并通过随机调整排列顺序得到测试数据集. 图 3a 和图 3d 所示为该数据集中一组输入图像及相应的真实排序.

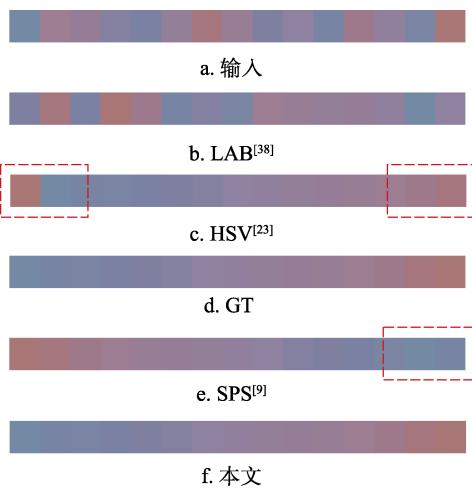


图 3 不同方法在单调色板色彩排序中的结果对比

(2) 对比方法. 将本文方法与 3 种排序方法进行对比, 包括基于 LAB 颜色空间的逻辑字典排序法(简称为 LAB)^[38]、基于 HSV 颜色空间的逻辑字典排序法(简称为 HSV)^[23]和单个调色板下的最近邻色彩排序法(简称为 SPS)^[9].

(3) 评价指标. 采用 SR、莱文斯坦距离(Levenshtein distance, LD)和最长递增子序列(length of the longest increasing subsequence, LLIS)这 3 个指标评估有效性. 其中, SR 表示数据集中正确排序的调色板占全部参与排序调色板的比值, 正确排序要求在不考虑方向的前提下, 排序后的调色板与真实排序结果完全一致; LD 度量序列间差异的经典算子, 由 2 个调色板间转换的最少编辑(如字符替换、插入和删除)次数来计算; LLIS 指调色板中正确排序色彩(可不相邻)的最大长度.

图 3 所示为 4 种方法分别对同一组调色板进行排序后的对比结果, 其中, 红色虚线框表示与真实

排序结果中不一致的序列. 可以看出, 本文方法生成结果与 GT 一致. 表 2 所示为不同色彩排序方法在 3 个评价指标上的结果. 可以看出, 本文方法在 3 个指标上均优于其他 3 种方法; 相比较而言, LAB 方法明显劣于其他方法; 由于 FM100P 数据集中的数据多基于色度进行排序, 因此 HSV 方法具有较好表现, 仅次于本文方法.

表 2 单调色板下 4 种方法的结果比较

方法	SR	LD	LLIS
LAB ^[38]	0.001	0.783	0.475
HSV ^[23]	0.829	0.015	0.993
SPS ^[9]	0.789	0.045	0.966
本文	0.914	0.006	0.997

进一步, 对不同长度数据上各个指标进行实验, 结果如表 3 所示. 可以看出, 本文方法在调色板长度小于 30 时能够获得与真实排序完全一致的结果; 随着调色板长度增加, 优化求解空间逐渐变大, 整个序列的排序 SR 指标降低较为明显, 但是在局部排序上 LD 和 LLIS 指标仍然有较好的表现.

表 3 本文方法在不同长度单调色板上的比较

色板长度	SR	LD	LLIS
10	1.000	0.000	1.000
15	1.000	0.000	1.000
20	1.000	0.000	1.000
25	1.000	0.000	1.000
30	0.950	0.003	0.998
35	0.790	0.014	0.992
40	0.660	0.023	0.988

4.1.2 PPS 定量分析

(1) 数据集. 采用 Kim 等^[9]提出的 KHTP 数据集进行 PPS 的评估. 该数据集包括从 100 对长度为 10 的、顺序排列的调色板, 通过色彩混合、抖动和插值操作生成的共 1 600 对调色板.

(2) 对比方法. 将本文方法与 3 种专门针对多调色板的排序方法进行对比, 包括 BPS^[8]、改进的二分排序法(improved binary palette sorting, I-BPS)^[9]和 PPS. 其中, I-BPS 首先基于 SPS 算法^[9]分别对调色板排序, 然后用 BPS^[8]进行排序.

(3) 评价指标. 通过分别计算排序后的调色板的 LD 和 LLIS 指标, 评估 PPS 的有效性. 图 4 所示为 4 种方法分别对同一组多调色板进行联合排序后的结果. 可以看出, 本文方法与 GT 最接近.

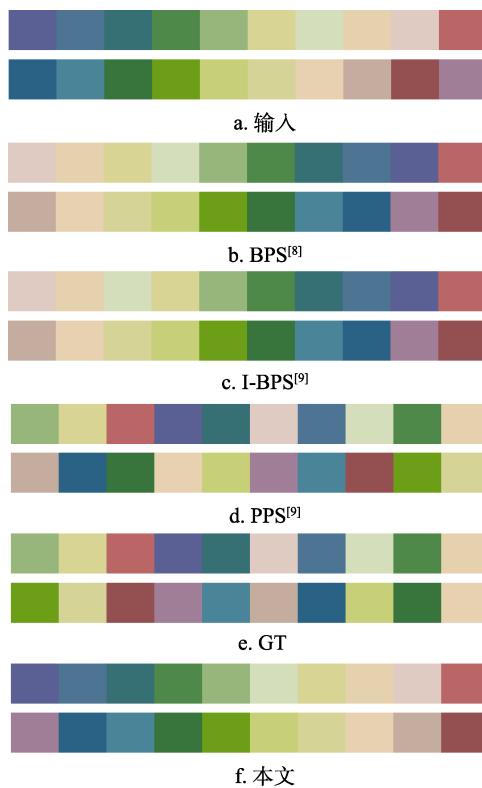


图 4 不同方法在多调色板色彩排序中的结果对比

表 4 所示为不同排序方法在 KHTP 数据集上的实验结果。可以看出，本文方法优于其他 3 种方法，尽管该方法并未对多个调色板的排序设计约束条件，但仍能够在各个调色板上均获得较好的结果；但是，由于 KHTP 数据集各个调色板中的色彩在色度、饱和度、亮度等属性上更为多变，本文方法的整体表现逊色于 SPS 上的表现。

表 4 多调色板排序下不同方法的结果比较

方法	LD	LLIS
BPS ^[8]	0.772	0.465
I-BPS ^[9]	0.639	0.475
PPS ^[9]	0.624	0.485
本文	0.555	0.606

4.2 用户实验

4.2.1 实验 1. 色彩有序性

通过用户实验，定性比较与同类排序方法 SPS^[9]，HSV^[23]的差异，评估本文方法在生成感知一致色彩排序方面的有效性。

本文利用 Kim 等^[9]提出的 LHSP 数据集开展实验，该数据集包含具有 5~30 种不同长度的调色板，每种长度下有 5~50 个调色板不等。由于长度大于 15 的调色板在实际可视化应用中使用较少，用户实验中不考虑大于 15 个的调色板。因此，本文从

具有 5, 10, 15 个色彩的调色板数据集中分别随机选取 10 个调色板，用本文方法、SPS^[9]和 HSV^[23]分别生成 30 种排序后的调色板作为实验数据。

本实验中，每个用户均观察 90 对调色板，要求尽可能快地从每对调色板中选取排序更自然的一个调色板。每对调色板中均包含一个本文方法生成的结果，另一个结果则可能来自 SPS^[9]，HSV^[23]和初始调色板。为了减少学习对于实验结果的影响，实验过程中打乱了每对调色板的先后顺序及左右排列顺序。共有 30 位色觉正常的用户参与实验，包括 18~39 岁的 8 位女性和 22 位男性，每位用户均获得 15 元报酬。实验结果如图 5 所示，其中，橙色柱形表示用户选择本文方法结果的比例，灰色柱形表示用户选择同类方法(输入、SPS 或者 HSV)的比例，当该数值高于 50% (红色虚线)时，表明用户认为相应方法得到的调色板更有序。可以看出，本文方法均优于其他同类方法，更容易让用户感知到色彩之间的排列有序性。

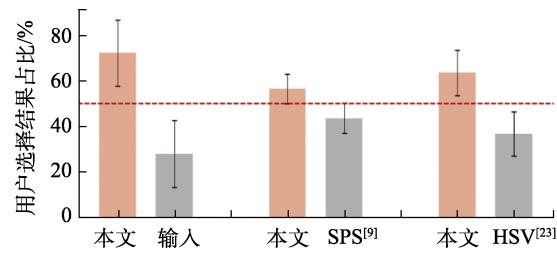


图 5 调色板排序用户实验统计结果

4.2.2 实验 2. 色彩相似性比较

为了评估色彩排序对于调色板相似性比较任务的影响，本文基于 LHSP 数据集^[9]开展用户实验。给定参考调色板和待选调色板，要求用户能够尽可能快地、尽可能精确地选择出与参考调色板最为相似的调色板。

实验数据。参考调色板采用实验 1 中的 30 种输入调色板，待选调色板中应包含一个与参考调色板颜色相似的调色板，以及一个与其不相似的调色板。LHSP 数据集^[9]中为每组调色板都提供了相似性检索数据集，本文以此为基础生成待选调色板集合。对于每个参考调色板，首先利用 Kim 等^[9]提出的方法对检索数据集中的调色板计算相似性，并从反馈结果的前 10 个最相似的结果中选取第 2 个为相似色板、第 10 个为不相似色板，以此作为相应的待选调色板。图 6 所示为一组实验数据，其中，灰色虚线框内为未排序时的参考调色板和待选调色板，绿色虚线框内为本文方法排序后的

相应结果。实验的目的是比较原始输入与本文方法排序后的调色板在相似性比较的任务上的差异。每个用户将执行 60 个实验任务, 每个实验任务要求用户从 2 个待选调色板中选择与参考调色板更相似的那个, 实验过程中记录了用户选择和耗时情况; 各组实验任务中的调色板左右排列以及先后顺序均被随机打乱, 以减少学习效应。共有 30 位色觉正常的用户参与实验, 包括 18~39 岁的 7 位女性和 23 位男性, 每位用户均获得 10 元报酬。



图 6 不同色彩排序对调色板比较任务中的数据示例

实验结果如图 7 所示, 其中, 橙色箱形图表示本文结果, 绿色箱形图表示输入对应的结果。可以看出, 与未排序的调色板相比, 本文方法排序后的调色板更容易让用户选择出正确的结果, 在相似性比较中获得更高的准确率; 在本文方法排序后的实验数据中, 用户能够以更快的速度完成实验, 平均每个任务耗时比未排序的快近 2 s。实验结果表明, 与未排序的调色板相比, 排序后的调色板能使用户以更短的时间、更高的准确率执行相似性比较任务。

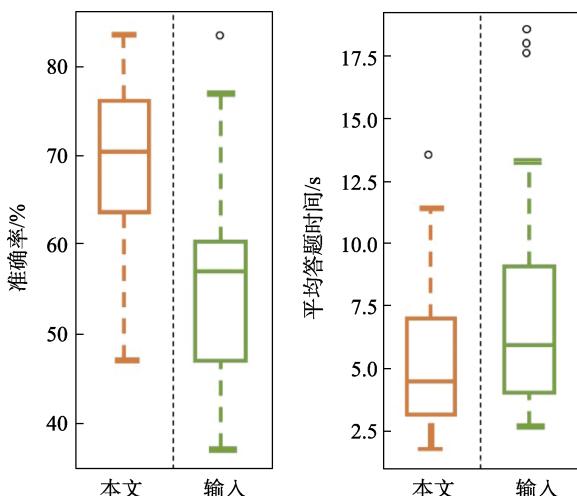


图 7 色彩相似性比较用户实验统计结果

5 总 结

本文提出一种面向调色板设计的感知驱动的

色彩排序方法。该方法基于感知有序性度量, 建立符合全局有序、局部有序以及连续性等约束色彩排序优化方程; 在此基础上, 开发了调色板设计系统, 可以实现调色板选取、调色板全局探索、基于样例的调色板检索等功能。在 3 个调色板数据集上, 利用定量度量、用户调查与多种同类方法进行实验, 验证了本文方法在调色板排序上的有效性; 并通过用户实验, 验证了该方法在调色板视觉比较中的作用。

本文采用 PSO 算法对优化方程进行求解, 当色板长度过大时(如表 3 所示), 由于求解空间较大, 优化算法可能陷入局部最优解; 未来可以引入分治思想, 通过聚类方法对调色板中的色彩进行分组, 组内和组间分别排序并重新组合以获取理想的结果。对于色相差异较大的调色板, 尽管能够满足一定的局部有序性, 但是难以获得满足全局有序性的排序^[25]。本文同时提供了全局有序性和局部视觉连贯性约束, 但无法自适应地为具有不同色相差异的调色板分配各约束项权值。Bujack 等^[27]提出, 尽管色相不是内在有序的, 但若不同色相在色彩空间的欧几里得距离不超过一半的色相环时, 仍可能提供全局有序的感知。未来可借助这一理论探索更具泛化能力的色彩自动排序方法。本文依据调色板的颜色属性进行排序, 在算法设计以及系统开发的过程中未考虑调色板所应用的背景环境。由于同一色彩在不同背景环境(如不透明度、亮度)中可能让人们产生视觉感知上的变化^[36], 色彩顺序的感知也将受到影响。因此定性分析背景环境对于色彩顺序感知的影响并对其定量建模, 也是未来值得关注的方向。本文系统中, 全局探索视图采用散点分布表示各个调色板及其色彩距离, 并用鼠标交互显示调色板, 但散点的表达难以直观地呈现调色板, 如何设计调色板集合的色立体空间可视表达方式, 值得在未来进一步探索。

参考文献(References):

- [1] Lu K C, Feng M, Chen X, et al. Palettailor: discriminable colorization for categorical data[J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2021, 27(2): 475-484
- [2] Hu G S, Pan Z G, Zhang M M, et al. An interactive method for generating harmonious color schemes[J]. Color Research & Application, 2014, 39(1): 70-78
- [3] Wijffelaars M, Vliegen R, Van Wijk J J, et al. Generating color palettes using intuitive parameters[J]. Computer Graphics Forum, 2008, 27(3): 743-750
- [4] Wang Y H, Chen X, Ge T, et al. Optimizing color assignment for perception of class separability in multiclass scatterplots[J].

- IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2019, 25(1): 820-829
- [5] Harrower M, Brewer C A. ColorBrewer.org: an online tool for selecting colour schemes for maps[J]. The Cartographic Journal, 2003, 40(1): 27-37
- [6] Yang J, Chen Y, Westland S, et al. Predicting visual similarity between colour palettes[J]. Color Research & Application, 2020, 45(3): 401-408
- [7] Wu J L, Yang J, Wei M C, et al. Characterization of color differences for color palettes[C] //Proceeding of the 28th Color and Imaging Conference. Springfield: Society for Imaging Science and Technology Press, 2020: 232-236
- [8] Phan H Q, Fu H B, Chan A B. Color orchestra: ordering color palettes for interpolation and prediction[J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2018, 24(6): 1942-1955
- [9] Kim S, Choi S. Dynamic closest color warping to sort and compare palettes[J]. ACM Transactions on Graphics, 2021, 40(4): Article No.95
- [10] Shugrina M, Zhang W, Chevalier F, et al. Color Builder: a direct manipulation interface for versatile color theme authoring[C] //Proceedings of the CHI Conference on Human Factors in Computing Systems. New York: ACM Press, 2019: Article No.456
- [11] Chen H D, Chen W, Mei H H, et al. Visual abstraction and exploration of multi-class scatterplots[J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2014, 20(12): 1683-1692
- [12] Gramazio C C, Laidlaw D H, Schloss K B. Colorgorical: creating discriminable and preferable color palettes for information visualization[J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2017, 23(1): 521-530
- [13] Lin S, Fortuna J, Kulkarni C, et al. Selecting semantically-resonant colors for data visualization[J]. Computer Graphics Forum, 2013, 32(3pt4): 401-410
- [14] Lin S, Hanrahan P. Modeling how people extract color themes from images[C] //Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems. New York: ACM Press, 2013: 3101-3110
- [15] Chang H W, Fried O, Liu Y M, et al. Palette-based photo recoloring[J]. ACM Transactions on Graphics, 2015, 34(4): Article No.139
- [16] O'Donovan P, Agarwala A, Hertzmann A. Color compatibility from large datasets[J]. ACM Transactions on Graphics, 2011, 30(4): Article No.63
- [17] Panetta K, Bao L, Agaian S, et al. Color theme-based aesthetic enhancement algorithm to emulate the human perception of beauty in photos[J]. ACM Transactions on Multimedia Computing, Communications, and Applications, 2019, 15(2s): Article No.62
- [18] Gunduz A B, Taskin B, Yavuz A G, et al. A better way of extracting dominant colors using salient objects with semantic segmentation[J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2021, 100: Article No.104204
- [19] Son K, Oh S Y, Kim Y, et al. Color sommelier: interactive color recommendation system based on community-generated color palettes[C] //Proceedings of the 28th Annual ACM Symposium on User Interface Software & Technology. New York: ACM Press, 2015: 95-96
- [20] Meier B J, Spalter A M, Karelitz D B. Interactive color palette tools[J]. IEEE Computer Graphics and Applications, 2004, 24(3): 64-72
- [21] Pan Q Q, Westland S. Comparative evaluation of color differences between color palettes[C] //Proceedings of the 26th Color and Imaging Conference. Springfield: Society for Imaging Science and Technology Press, 2018: 110-115
- [22] Skaff S, Marchesotti L, Csurka G, et al. A study on perceptually coherent distance measures for color schemes[C] //Proceedings of the 19th Color and Imaging Conference. Springfield: Society for Imaging Science and Technology Press, 2011: 247-252
- [23] Schoeffmann K, Ahlström D, Böszörmenyi L. 3D storyboards for interactive visual search[C] //Proceedings of the IEEE International Conference on Multimedia and Expo. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 2012: 848-853
- [24] Levkowitz H, Herman G T. Color scales for image data[J]. IEEE Computer Graphics and Applications, 1992, 12(1): 72-80
- [25] Borland D, Taylor II R M. Rainbow color map (still) considered harmful[J]. IEEE Computer Graphics and Applications, 2007, 27(2): 14-17
- [26] 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, 2018, 24(1): 923-933
- [27] Bujack R, Turton T L, Rogers D H, et al. Ordering perceptions about perceptual order[C] //Proceedings of the IEEE Scientific Visualization Conference. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 2018: 32-36
- [28] Ware C. Information visualization: perception for design[M]. 3rd ed. San Francisco: Morgan Kaufmann Publishers Inc., 2012
- [29] Tominski C, Fuchs G, Schumann H. Task-driven color coding[C] //Proceedings of the 12th International Conference Information Visualisation. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 2008: 373-380
- [30] Kirkpatrick S, Gelatt Jr C D, Vecchi M P. Optimization by simulated annealing[J]. science, 1983, 220(4598): 671-680
- [31] Holland J H. Adaptation in natural and artificial systems: an introductory analysis with applications to biology, control, and artificial intelligence[M]. MIT press, 1992
- [32] Dorigo M, Maniezzo V, Colorni A. Ant system: optimization by a colony of cooperating agents[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, 1996, 26(1): 29-41
- [33] Kennedy J, Eberhart R. Particle swarm optimization[C] //Proceedings of the International Conference on Neural Networks. IEEE, 1995, 4: 1942-1948
- [34] van der Maaten L, Hinton G. Visualizing data using t-SNE[J]. Journal of Machine Learning Research, 2008, 9(86): 2579-2605
- [35] Cuff D J. Colour on temperature maps[J]. The Cartographic Journal, 1973, 10(1): 17-21
- [36] Schloss K B, Gramazio C C, Silverman A T, et al. Mapping color to meaning in colormap data visualizations[J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2019, 25(1): 810-819
- [37] Farnsworth D. The Farnsworth-Munsell 100-hue and dichotomous tests for color vision[J]. Journal of the Optical Society of America, 1943, 33(10): 568-578
- [38] Zaccarin A, Liu B. A novel approach for coding color quantized images[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 1993, 2(4): 442-453