

引用格式: 邬开俊, 单宏全, 魏赞, 等. 多任务分解与自适应色彩均衡融合下的敦煌壁画色彩增强 [J]. 电子科技大学学报, 2025, 54(3): 384-392.
WU K J, SHAN H Q, WEI Y, et al. Color enhancement of dunhuang murals under the fusion of multi-task decomposition and adaptive color equalization[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2025, 54(3): 384-392.

多任务分解与自适应色彩均衡融合下的 敦煌壁画色彩增强



邬开俊, 单宏全*, 魏 赞, 田 彬, 王璐璐

(兰州交通大学 电子与信息工程学院, 兰州 730070)

摘要: 针对壁画图像在拍摄过程中存在的环境光色辐射以及由于年代原因形成的色彩退化等问题, 提出了多任务分解与自适应色彩均衡融合下的敦煌壁画色彩恢复增强算法。该算法通过分析壁画图像存在的问题, 对问题进行任务分解, 首先对壁画各通道信息提取暗通道信息并进行纹理和细节增强, 同时为避免增强后原始壁画上存在的脏点影响色彩增强效果, 又对其进行局部滤波处理, 并配合自适应色彩均衡模型, 使输出壁画不仅在色彩上有了较好地提升, 纹理信息也更加丰富。随后采用融合算法, 融合自适应色彩均衡与滤波后的结果, 使壁画细节及色彩信息更加丰富, 壁画图像对比度、能量值以及相关性均得到提升。

关键词: 敦煌壁画; 双向滤波; 多任务分解; 自适应色彩均衡; 通道分离; 色彩增强

中图分类号: TP391 文献标志码: A DOI: 10.12178/1001-0548.2024082

Color enhancement of dunhuang murals under the fusion of multi-task decomposition and adaptive color equalization

WU Kaijun, SHAN Hongquan*, WEI Yun, TIAN Bin, and WANG Lulu

(School of Electronic and Information Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: Aiming at the problems of environmental light color radiation and color degradation caused by age in the shooting process of mural images, a color restoration and enhancement algorithm of Dunhuang murals under the fusion of multi-task decomposition and adaptive color equalization is proposed for the first time to solve the above problems. By analyzing the problems existing in the mural image, the dark channel information is first extracted from each channel of the mural and the texture and detail are enhanced. At the same time, in order to avoid the dirty points on the original mural after enhancement affecting the color enhancement effect, the local filtering processing is carried out, and the adaptive color equalization model is used to make the output mural not only improve the color, but also enrich the texture information. Then, the fusion algorithm is used to fuse the results of adaptive color equalization and filtering, which makes the details and color information of the mural more abundant, and the contrast, energy value and correlation of the mural image are greatly improved.

Key words: Dunhuang murals; bidirectional filtering; multi-task decomposition; adaptive color balance; channel separation; color enhancement

随着时代的推移以及自然天气的侵蚀, 敦煌壁画已破损严重, 存在色彩淡化、脱落、裂缝、纹理细节消失等问题, 当这些问题相互作用时会使修复工作更加困难。现有的色彩恢复算法主要集中于传统算法, 分为基于空间域的图像色彩恢复和基于频率域的图像色彩恢复两大类。空间域图像色彩恢复主要是对图像的像素进行处理, 通过调整壁画图像色彩的三通道以及灰度映射和色彩空间转换来恢复

图像色彩, 主要代表方法有: 1) 直方图均衡化^[1], 该方法将原始图像的直方图分布变为近似均匀分布, 以此增强图像的对比度。2) 自适应直方图均衡化^[2]是基于图像的灰度直方图, 以此来调整图像的灰度分布, 平衡图像较暗和较亮区域。3) 限制对比度自适应直方图均衡化^[3]法, 该方法主要为预先设置阈值, 通过滑动窗口计算各个模块的直方图并构建映射函数, 大于阈值的部分将会平均到各个

收稿日期: 2024-04-10

基金项目: 甘肃省自然科学基金(23JRRA913); 兰州交通大学重点研发项目(ZDYF2304)

作者简介: 邬开俊, 博士, 教授, 主要从事计算机视觉和神经元动力学方面的研究。

*通信作者 E-mail: 1554435955@qq.com

子灰度级, 使图像变化区域平缓, 如灰度世界假设算法^[4]、非线性色彩增强算法^[5]等。4) 利用卷积运算, 如中值滤波、均值滤波、双边滤波、多级小波变换^[6]算法等。

频域类算法主要有离散傅里叶变换、拉普拉斯金字塔、多级小波变换映射^[7]等算法, 通过该类方法将图像的频域信息表现出来再进一步增强。除此之外, 还衍生出一些针对沙尘天气下色彩恢复的算法, 主要包括基于 RGB 色彩空间^[8]的灰度世界算法和基于 YUV 色彩空间^[9]的白色补丁算法, 该类方法可以在一定程度上恢复图像色彩, 但仍然存在噪声和偏色问题。文献 [10] 通过双边滤波算法配合色彩差值进行色彩恢复; 文献 [11] 提出了一种基于 Retinex 的图像色彩校正算法, 该算法考虑了图像中颜色和亮度的空间位置关系对局部进行自适应滤波, 实现具有局部和非线性特征的图像亮度、色彩与对比度调整, 同时满足灰度世界理论和白斑点假设, 但或多或少存在色调不符合人眼视觉的观测。

1 相关工作

色彩增强在最近几年被研究者逐渐关注起来, 然而对于文物色彩还原方面的研究较少。文献 [12] 提出了多尺度 Retinex 算法 MSR, 主要采用中心环绕的方法来估算图像的照射分量, 认为某一目标像素点的照射分量与其领域内的像素有关, 并且距离越近影响越大。文献 [13] 又提出了 MSRCR 算法, 该算法主要思想是利用图像各波段的色彩比例系数对图像进行色彩恢复。文献 [14] 为了使图像进行适度的锐化和细节增强, 采用构建一种保边多尺度图像分解的新方法, 并证明了该方法在 HDR 色调映射以及细节增强方面的有效性。除此之外, 部分学者用非线性滤波器对伪影较少的细节进行增强, 如加权最小二乘^[15]。基于此, 文献 [16] 为了使模型可以学习人类艺术家对图像所作的特定内容的调整使得更符合审美艺术, 提出了一种端到端的图像色彩增强框架, 主要由色彩恢复、直方图匹配和色彩

信号预测 3 个子网组成, 其中颜色恢复采用深度神经网络 (deep neural networks, DNN) 来表示输入与增强图像之间的高度非线性和空间变化映射, 该模型很好地解决了老照片上色问题, 但只能对灰度照片上色。随后文献 [17] 提出了一种新的自动照片增强框架, 逐步对全局饱和度进行校正、人脸增强、天空增强、阴影增强、细节和纹理增强。文献 [18] 通过研究水对红绿蓝光吸收的强弱程度, 借助显著性目标检测方法, 通过平均前景色和背景色的平均像素强度进而重建图像色彩信息。文献 [19] 首先对图像进行分离得到亮度图像和色彩图像之后, 利用曝光技术对图像进行多重曝光并融合, 最后采用伽马校正调整回 RGB 图像。

对于敦煌壁画而言, 除破损之外, 还存在色彩退化, 尤其是因壁画色彩退化带来的纹理模糊、内容边界轮廓模糊、服饰失色、壁画亮度信息不足、存在污点等问题。

因此, 本文针对现有敦煌壁画数据集的特点, 结合通道分离、图像增强、双边滤波、通道分离、暗通道先验以及自适应色彩均衡算法, 逐步设计色彩恢复和融合算法, 较好地解决了敦煌壁画在颜色方面的问题。

本文工作的主要贡献如下。1) 尝试敦煌壁画色彩恢复, 提出了多任务分解与自适应色彩均衡下的敦煌壁画色彩恢复算法, 能准确把握壁画各部分的色彩信息并较好地提升壁画颜色。2) 提出了壁画纹理显现算法, 通过对壁画图像进行细节增强, 为避免凸显壁画图像脏点信息, 又对其采用双边滤波处理, 并配合色彩恢复模型使得输出壁画不仅色彩有了较好地提升, 纹理信息也更加丰富。3) 针对壁画各通道信息进行色彩增强, 并设计融合算法, 和自适应色彩均衡算法输出结果融合出更加丰富的壁画细节信息以及壁画色彩。

2 算法设计

算法具体结构如图 1 所示。

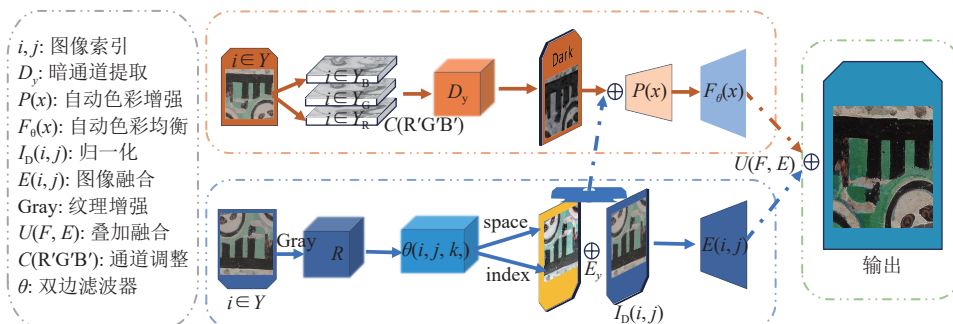


图 1 算法结构图

2.1 壁画问题分析

现有敦煌壁画普遍存在有色彩暗淡、对比度不高、纹理信息模糊等问题，具体如图 2 所示。除此之外，由于拍摄时受环境光色散的作用，整体色调偏向壁画中色彩范围分布较大的分值，本文通过分析壁画 RGB 色彩空间和 LAB 色彩空间（如图 3 所示），以及分析原始壁画携带的能量、纹理信息、色彩分布（如图 4 所示），发现色彩淡化问题严重，细节信息模糊，在 LAB 色彩空间中，L 通

道表示图像的亮度信息，其取值范围为 0~100；A 通道表示图像从绿色到红色的变化，正值表示红色，负值表示绿色，其取值范围为-128~127；B 通道表示图像从蓝色到黄色的颜色变化，正值表示黄色，负值表示蓝色，其取值范围为 -128~127。由图 2 可知，壁画的 LAB 色彩空间分布中的 B 通道整体取值大于 0，表明图像的颜色整体上偏向于黄色，色彩分布范围不均。



图 2 原始壁画色彩

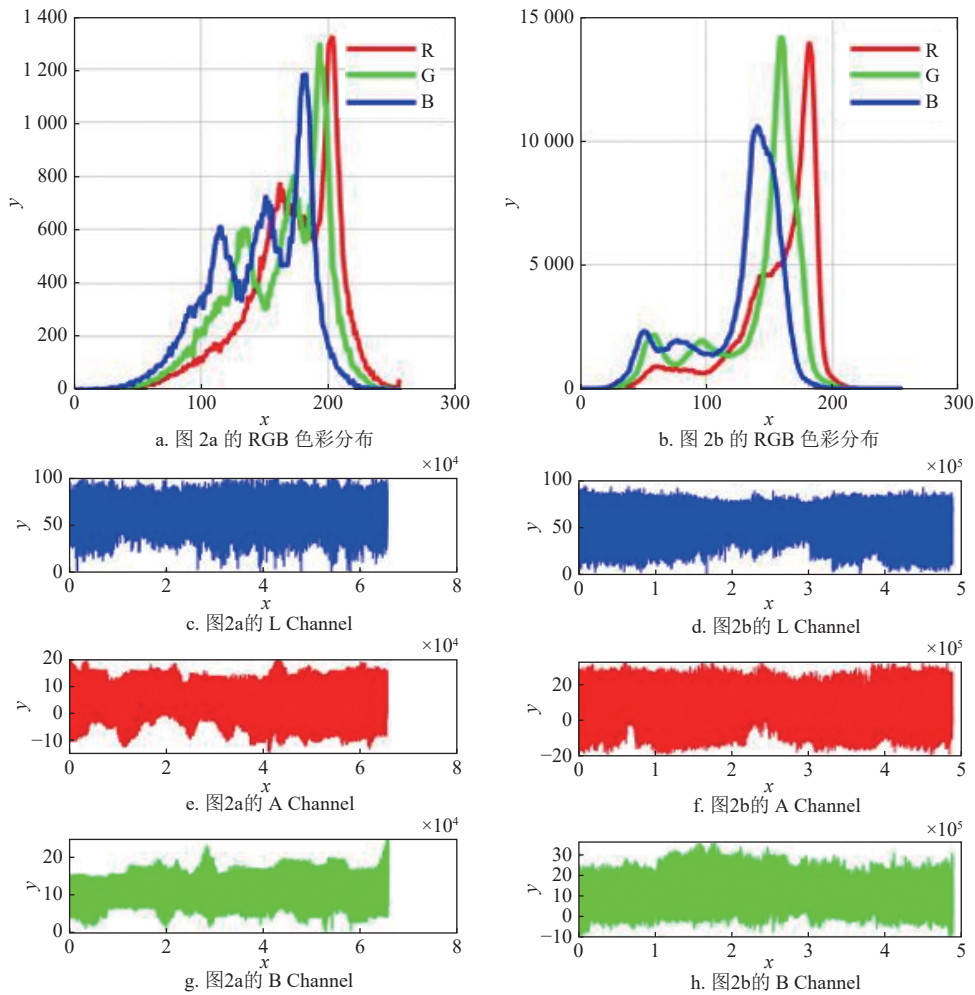


图 3 色彩分布图

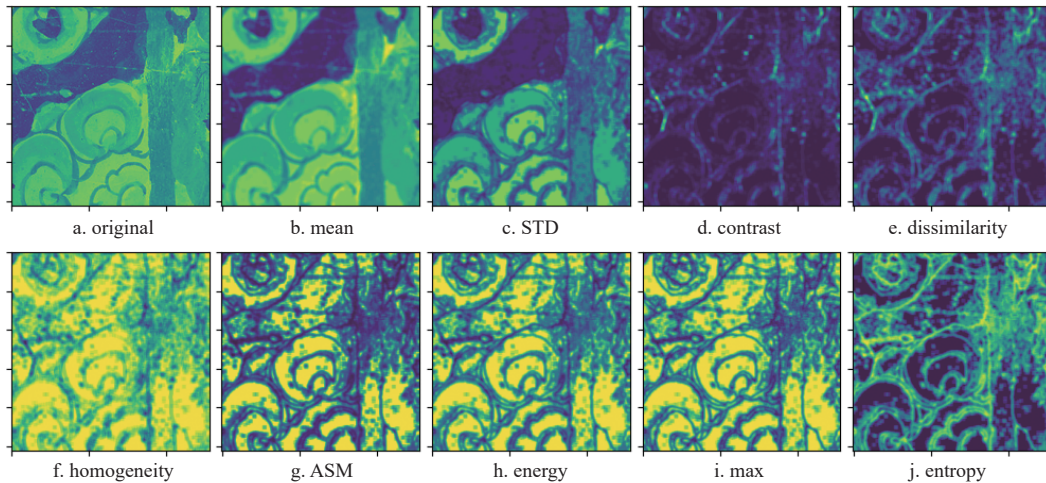


图4 原壁画图像分析指标可视化

由图3可知, 壁画的LAB色彩空间分布中的B通道整体取值大于0, 表明图像的颜色整体上偏向于黄色, 色彩分布范围不均。并且颜色退化严重, 细节信息模糊。

由图4以及表1可知, 壁画纹理信息相对模糊、分布不均匀、相邻像素之间的灰度级别不相似度较高、纹理信息不规律性较高, 且壁画内容之间的相关性较低, 进而影响壁画图像的修复结果。

表1 原始壁画指标

指标	Dissimilarity↓	Contrast↑	Homogeneity↑	Energy↑	Correlation↑
数值	12.719 8	425.366 6	0.151 5	0.018 3	0.832 7

图像的不相似度 (dissimilarity) 是指图像中相邻像素之间的灰度级别的差异程度。当不相似度较低时, 表示图像中的相邻像素之间的灰度级别更加相似, 表现为更加均匀的纹理。对比度 (contrast) 是描述图像中不同区域之间灰度级别差异的度量, 是一种重要的图像评价指标, 常用于评估图像的清晰度和视觉质量, 更高的对比度意味着图像更清晰。而均匀度 (homogeneity) 则是指相邻像素之间的灰度级别更为接近, 即图像中灰度级别的变化更为平缓均匀。能量 (energy) 反映了图像中灰度级别分布的均匀程度, 较高的能量表示图像中的纹理更加平滑, 灰度级别更加均匀地分布在图像区域内。相关性 (correlation) 衡量了图像中灰度级别之间的关联程度, 较高的相关性意味着图像中的灰度级别之间具有更强的相关性, 通常表示图像中的纹理更加有规律和可预测性。因此, 综合考虑这些特征可以更好地描述和理解图像的纹理特性。

2.2 壁画色彩增强算法介绍

根据上述内容, 通过借鉴图像去雾算法, 引入通道分离下的壁画暗通道提取算法 (如图1中 D_y 部

分所示)。根据图像拍摄统计规律, 在图像拍摄过程中, 图像普遍会存在局部区域至少有一个通道具有非常低的像素值, 首先将修复后的图像通过提取3个颜色通道的最小值来获取暗通道信息, 具体为:

$$D^{\text{dark}}(x) = \min_{c \in \{r, g, b\}} (\min_{y \in \Omega(x)} (Y^c(i))) \quad (1)$$

式中, i 为图像的像素值; c 为图像的RGB通道; y 为整幅图像空间; $D^{\text{dark}}(x)$ 为获取到的暗通道信息 (如图1中 D_y 部分)。首先将该图像转换为LAB色彩空间, 并通过提取亮度通道信息并计算亮度通道的均值和标准差, 对亮度进行均衡化, 随后合并亮度通道和色彩通道并转换回BGR色彩空间, 融合暗通道信息并进行环境色彩辐射消除, 如:

$$P(x) = \frac{I(x) - A}{\max(t(x), t_0)} + A + \lambda(D^{\text{dark}}(x)) \quad (2)$$

式中, $I(x)$ 为光强度, 通过测量可得; A 为周围环境光; $t(x)$ 为壁画光照透射; 为防止环境透射参数过小, 引入参数 $t_0 = 0.1$, $\lambda = 0.5$ 为暗通道融合参数; $P(x)$ 代表自动色彩均衡结果 (如图1中 $P(x)$), 透射图的计算基于图像的最小通道, 并通过滑动窗口的方式在图像上进行局部最小值计算。

为了更加突出壁画纹理等细节信息, 采用灰度世界算法原理来分析壁画细节信息, 并对细节部分进行增强, 对增强过度区域, 由于敦煌壁画在数据集采集过程中平衡了环境光照以及采用统一的光照强度和亮度, 因此采用双边滤波消除不必要的噪声。该滤波函数同时考虑了空间域和像素域, 具体为:

$$\text{Gray} = \frac{\text{img}_r + \text{img}_g + \text{img}_b}{3} \quad (3)$$

$$K_r = \frac{\text{Gray}}{\text{Avg}(\text{img}_r)} \quad (4)$$

$$K_g = \frac{\text{Gray}}{\text{Avg}(\text{img}_g)} \quad (5)$$

$$K_b = \frac{\text{Gray}}{\text{Avg}(\text{img}_b)} \quad (6)$$

$$C(R', G', B') = C(R, G, B) \times K_{r,g,b} \quad (7)$$

首先计算壁画图像各个通道的均值, 获得灰度值 Gray, 并获得各个通道的增益系数 K_r, K_b, K_g , 之后调整壁画 RGB 通道的分量 $C(R', G', B')$ 。

$$\omega(i, j, k, l) = \exp\left(-\frac{(i-k)^2 + (j-l)^2}{2\sigma_d^2} - \frac{\|I(i, k) - I(k, l)\|^2}{2\sigma_r^2}\right) \quad (8)$$

式中, σ_d 和 σ_r 为平滑系数; $I(i, j)$ 和 $I(k, l)$ 分别为像素强度, 对其进行归一化:

$$I_D(i, j) = \frac{\sum_{k,l} I(k, l) \omega(i, j, k, l)}{\sum_{k,l} \omega(i, j, k, l)} \quad (9)$$

式中, I_D 是像素 (i, j) 的去噪强度。再对去环境光辐射和滤波后的图像进行融合 (对应图 1 中 $E(i, j)$):

$$E(i, j) = \lambda P(i, j) + \mu I_D(i, j) \quad (10)$$

式中, $\lambda = 0.4$, $\mu = 0.6$, 为多次实验并测量结果得出, 对于不同数据集, 数值不同。在自适应色彩均衡阶段, 采用文献 [19] 中的函数, 用 k 个单调片段线性映射函数参数化色彩滤波器 (对应图 1 中 $F_\theta(x_k)$):

$$F_\theta(x_k) = \sum_{i=1}^{k-1} \theta_i + (Kx_k - (k-1))\theta_k \quad (11)$$

$$\text{s.t. } 0 \leq \theta_i \leq 1 \text{ and } \sum_i \theta_i = 1$$

式中, k 为单调线性片段个数; x_k 为落在映射函数的第 k 个块上的像素; $F_\theta(x_k)$ 为滤波后的输出, 需要注意的是本文没有在像素空间中进行优化, 而是在滤波器参数的潜在空间进行优化, 可通过梯度下降进行优化, 以实现特定的目标。显然, 当所有参数都等于 $1/k$ 时, 图像将保持不变 ($F_\theta(x_k) = x$)。因此, 建议通过对每个参数与其初始值 $1/k$ 之间的距离施加约束来控制调整:

$$\text{minimize}_\theta f(F_\theta(x)) + \lambda \sum_I (\theta_I - 1/k)^2 \quad (12)$$

式中, $k=2$ 。最后融合上述阶段输出的图像, 如图 1 中融合部分 $U(F, E)$:

$$U(F, E) = F_\theta(x)\delta + E(i, j)\beta + \varpi \quad (13)$$

本节通过结合通道分离、图像增强、纹理细节增强、双边滤波、暗通道先验以及自适应色彩均衡算法, 逐步设计了一种创新的色彩恢复和融合算法, 旨在解决敦煌壁画颜色退化问题。通过分离图

像的通道信息, 能更准确地捕获壁画中的颜色变化和细微纹理。随后, 通过图像增强技术, 对每个通道进行增强, 以增强壁画的整体视觉效果。通过纹理细节增强技术, 着重提升了壁画的纹理细节, 使得壁画更加清晰、生动。最后应用自适应色彩均衡算法, 对整个图像进行色彩平衡处理, 以确保壁画色彩的统一性和自然性。

3 实验结果分析

3.1 实验说明

本文采用敦煌研究院提供的数据集并经过扩展到 8 000 余张, 覆盖莫高窟壁画的各种题材, 以及网络爬取的壁画数据集 2 000 张用于色彩恢复后的分析对比。由于敦煌壁画历史悠久, 各个洞窟壁画所处环境相同, 色彩退化规律基本一致, 因此现存各壁画色彩单调, 颜色过渡不明显。现如今并无完整且颜色鲜艳的壁画存在, 无法进行深度学习相关的训练以及对比, 因此采用特征鲜明、思想较为经典的传统算法进行实验对比。

1) Demir^[20]: 提出了一种新的图像处理技术, 通过一种数据驱动的方法来解决极端低光条件下快速成像系统的挑战。包括颜色转换、去马赛克、降噪和图像增强等。

2) Reinhard^[21]: 一种基于颜色统计的方法用于色彩恢复, 用于将一幅图像的色彩特征转移到另一幅图像上。

3) Welsh^[22]: 提出了一种通过将色彩图像迁移到灰度图上的色彩传递算法, 在灰度图中, 图像灰度值可以体现图像上各个部分之间的差异, 根据像素亮度及其邻域统计特征的相似性寻找目标像素的最佳匹配点, 进而实现经典的色彩传递技术。

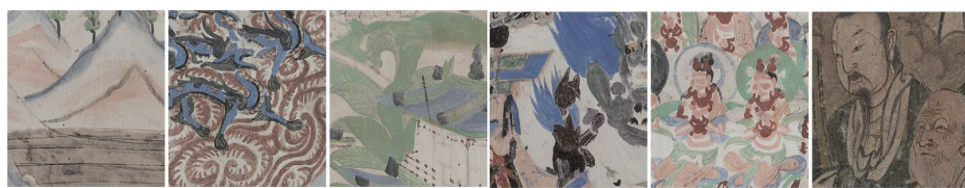
4) Zuiderveld^[23]: 一种直方图均值化算法, 将色彩图像转换为灰度图并进行直方图均值化。

3.2 定性分析

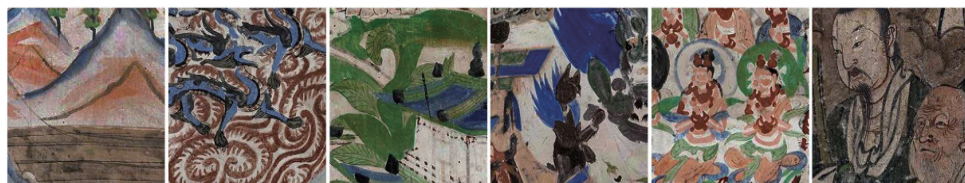
图 5 为经过本文算法色彩增强的效果展示图, 第一行为原图, 第二行为色彩增强后的图。相较于原始图像, 原本存在的色彩暗淡、亮度不足、纹理退化等问题, 在经过本文提出的色彩增强算法增强后, 壁画图像整体色泽更加饱满、色彩更加丰富、颜色过渡更为自然, 整体色彩分布更加均匀、清晰。此外, 算法成功地恢复了壁画图像的色彩和亮度信息, 使得壁画的纹理和内容边界得以有效增强。图 6 为采用不同色彩增强方法的对比图。其中算法 Welsh 与 Reinhard 受参照图像影响较大, 该算法主要基于颜色统计方法, 将一幅图像的颜色信息转移到另一幅颜色相近的图像之上, 算法

Welsh 颜色修复效果较差, 主要受限于直方图均值化后的融合参数影响, 算法 Reinhard 对颜色恢复效果较为明显, 能基本满足人类视觉要求, 但还是

存在色彩饱和度不足等问题, 通过比较, 本文提出的算法最优, 对色彩增强效果较好, 并无偏色问题, 能满足实际参观以及文创需求。

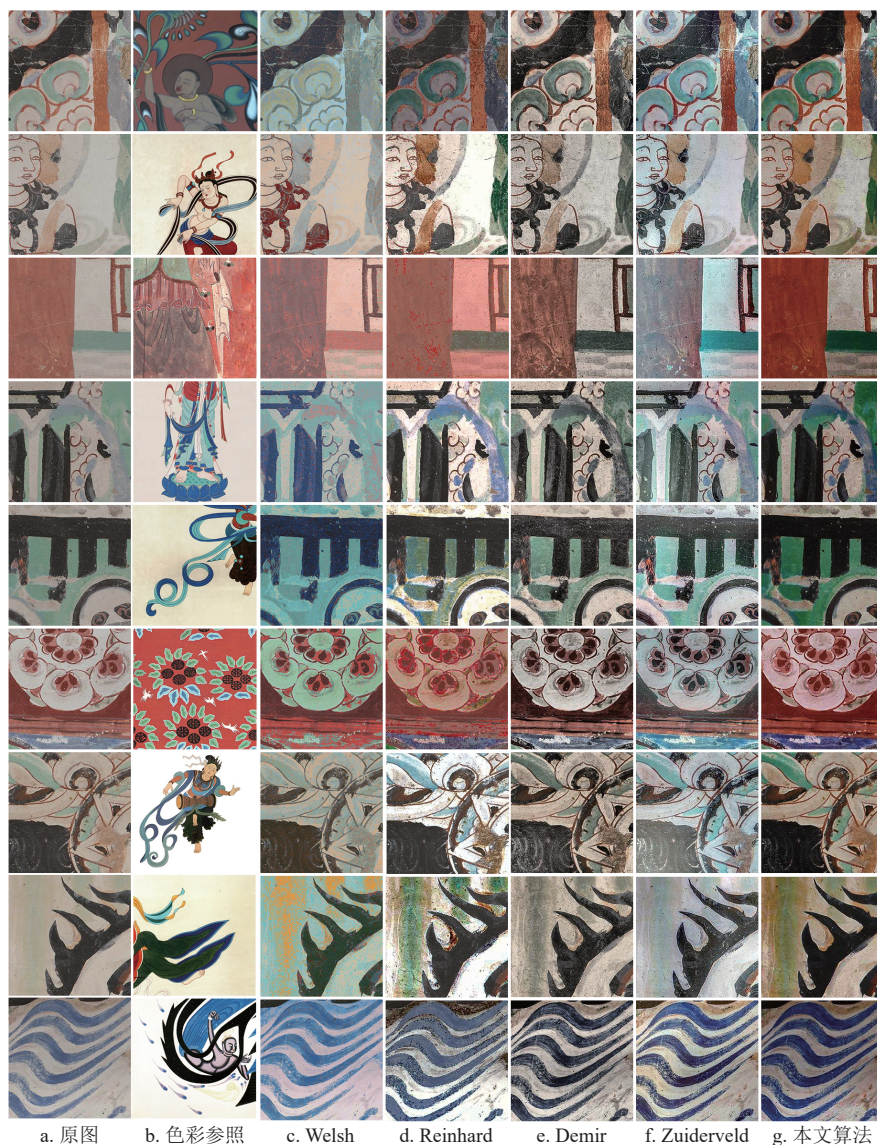


a. 原图



b. 色彩增强后的图

图5 壁画色彩增强效果展示



a. 原图 b. 色彩参照 c. Welsh d. Reinhard e. Demir f. Zuiderveld g. 本文算法

图6 色彩增强对比图

通过图 5 与图 6 的比较研究, 本文提出的算法不仅有效增强了壁画图像的色彩信息, 而且显著提升了图像的对比度, 增强了壁画图像的纹理和边缘细节。这一系列改进使得壁画的色彩更加生动丰富, 更具有视觉吸引力, 也更有利于后续研究和分析。

3.3 定量分析

为证明本文色彩增强算法对于色彩增强的先进

性, 进行了如下评价, 如表 2 所示, 并对评价指标进行可视化(灰度共生矩阵分析), 如图 7 所示。通过与图 4 相比, 本文算法不仅凸显了壁画的纹理信息, 且增加了壁画图像的色彩鲜艳度、对比度和细节表现。具体评价指标包括 Dissimilarity(不相似度)、Contrast(对比度)、Homogeneity(均匀度)、Energy(能量)、Correlation(相关性)。

表 2 色彩增强效果定量分析

指标	Welsh	Reinhard	Demir	Zuiderveld	本文算法	Avg
Dissimilarity↓	9.223 4	18.445 5	17.284 0	16.350 4	14.075 0	15.075 6
Contrast↑	309.507 9	523.012 8	764.205 4	804.721 6	1 051.321 4	690.553 8
Homogeneity↑	0.104 8	0.207 8	0.119 2	0.147 7	0.255 9	0.167 1
Energy↑	0.045 0	0.094 7	0.012 1	0.017 8	0.013 3	0.036 6
Correlation↑	0.902 4	0.894 4	0.886 3	0.870 4	0.913 2	0.893 3

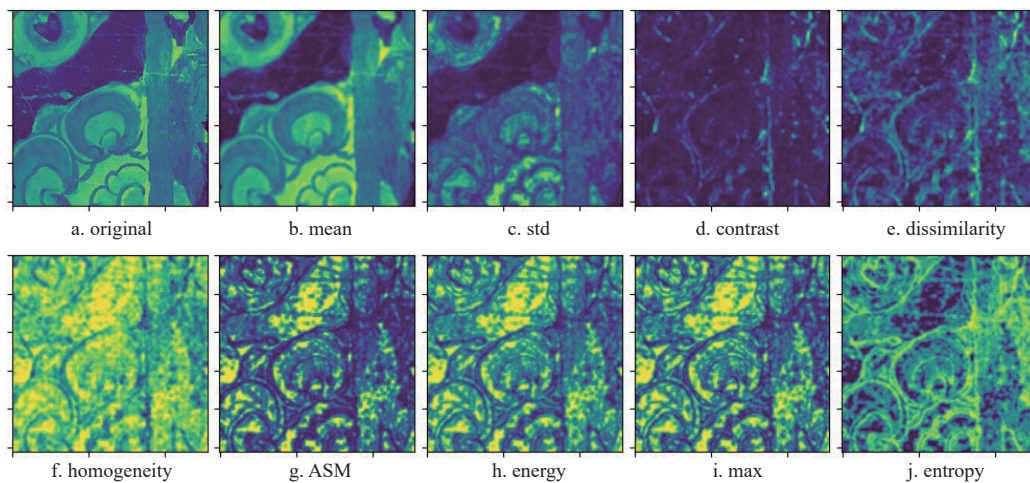


图 7 色彩恢复壁画指标可视化

由表 2 可知, 本文算法对壁画色彩的恢复效果较好。通过观察 Contrast、Homogeneity, Energy, Correlation 和可视化结果, 可以明显看到本文算法在色彩增强方面的先进性, 其对比度、平滑度、相关性达到了最优, 为壁画图像的保护、研究以及文创领域提供了更为可靠和高效的解决方案。

本文通过对测试集中随机选取的 100 张色彩增强

后的壁画图像进行评估, 并对色彩增强效果进行定量分析, 结果如表 3 所示。在所使用的评价指标中, 观察到了以下变化: Contrast 指标提高了 570, Dissimilarity 降低了 4, Homogeneity 提高了 0.07, Energy 降低了 0.004, 而 Correlation 则提高了 0.02。上述结果表明, 本文的色彩增强算法在改善壁画的色彩信息方面取得了显著成效, 使得壁画的色彩呈现更加艳丽生动。

表 3 色彩增强效果定量分析(对比表 1)

指标	Dissimilarity↓	Contrast↑	Homogeneity↑	Energy↑	Correlation↑
数值	16.952 4(↓4)	996.234 7(↑571)	0.225 0(↑0.07)	0.014 1(↓0.004)	0.924 5(↑0.02)

3.4 消融实验

为验证本文算法关键步骤的有效性, 设计了消融实验, 结果如表 2 及图 8 所示。其中 a 为原始输入图像; b 为通道分离增强后的图像, 该步骤提高了壁画的亮度信息以及纹理信息; c 为对 b 图像进行了

归一化处理, 使得壁画图像内容较为平滑; d 为双边滤波处理, 由该阶段的输出图像可以得到, 该算法消除了脏点、杂色、细小划痕等; e 为自动色彩增强, 该步骤较好地增强了壁画的色彩信息, 但亮度较暗, 色调较高, 存在失色现象; f 为色彩平衡后的

输出图, 该步骤较好地提升了壁画的亮度信息以及色调信息; g 为最后融合后的输出图。通过图 8 可以清晰看到, 本文算法各步骤均对图像的色彩提升较

为明显, 很好地控制了壁画色彩的色调、亮度、饱和度等信息。

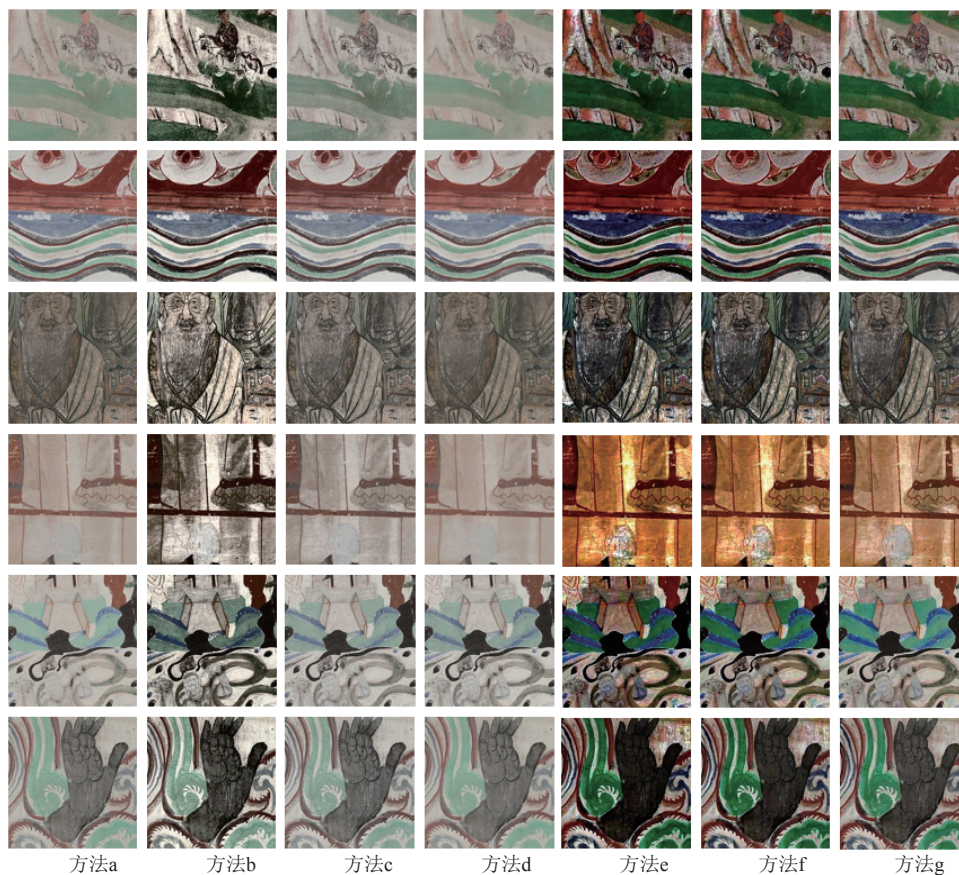


图 8 消融实验定性分析

为更加突出本文算法对壁画色彩恢复的有效性, 随机选择 100 张壁画图像用于算法测试, 并得到相关评价指标如表 4 所示。其中方法 a~方法 g 分别对应图 8 中的每一列。由该表可知, 本文算法较好地提升了壁画的色彩信息, 相较于原始输入图像, 本文算法评价指标中的对比度由 362.08 提升到 1 005.94, 均匀度由 0.22 提升到 0.24, 相关性由 0.83 提升到 0.90, 对壁画色彩增强效果明显。

表 4 消融实验定量分析

方法	指标				
	Dissimilarity↓	Contrast↑	Homogeneity↑	Energy↑	Correlation↑
a	6.347 4	362.080 8	0.219 1	0.031 3	0.833 0
b	22.952 5	908.713 3	0.087 4	0.008 492	0.861 6
c	9.613 3	625.9930	0.169 8	0.018 6	0.853 2
d	4.058 4	586.301 5	0.208 2	0.054 7	0.870 4
e	16.907 4	954.457 4	0.177 6	0.024 8	0.812 4
f	15.569 0	741.506 3	0.153 6	0.020 3	0.838 9
g	15.396 9	1 005.936 3	0.236 4	0.015 3	0.899 6

4 结束语

本文针对敦煌壁画色彩以及纹理问题, 提出通道分离与自适应色彩均衡融合下的敦煌壁画色彩增强算法。通过与敦煌研究院合作, 拿到真实壁画数据集, 经过分析分离出壁画的色彩信息、纹理信息等, 有针对性地采用暗通道提取、增强算法、双边滤波等算法, 解决对应的问题, 并设计融合策略, 融合上述输出结果。实验结果表明, 本文算法对于敦煌壁画色彩恢复具有明显增强作用, 使得壁画的色彩有了较好的提升, 并通过本文算法制作了 8 000 余张色彩丰富的壁画数据集, 解决了数据集单一问题。后续本文将注重壁画相似物体的颜色规律统计, 以求更加真实的壁画色彩信息, 进而满足敦煌壁画中各个题材的色彩。

参考文献

[1] HUMMEL R. Image enhancement by histogram

- transformation[J]. *Computer Graphics and Image Processing*, 1977, 6(2): 184-195.
- [2] REZA A M. Realization of the contrast limited adaptive histogram equalization (CLAHE) for real-time image enhancement[J]. *Journal of VLSI Signal Processing Systems for Signal, Image and Video Technology*, 2004, 38(1): 35-44.
- [3] PAN P W, YUAN F, CHENG E. Underwater image de-scattering and enhancing using dehazenet and HWD[J]. *Journal of Marine Science and Technology*, 2018, 26(4): 531-540.
- [4] TAO L. Adaptive and integrated neighborhood-dependent approach for nonlinear enhancement of color images[J]. *Journal of Electronic Imaging*, 2005, 14(4): 043006.
- [5] BABAKHANI P, ZAREI P. Automatic gamma correction based on average of brightness[J]. *Advances in Computer Science: An International Journal*, 2015, 4: 156-159.
- [6] HE J X, XING F Z, YANG R, et al. Fast single image dehazing via multilevel wavelet transform based optimization[EB/OL]. [2024-01-11]. <http://arxiv.org/abs/1904.08573v1>.
- [7] IQBAL K, ODETAYO M, JAMES A, et al. Enhancing the low quality images using unsupervised colour correction Method[C]//*Proceedings of the IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*. New York: IEEE, 2010: 1703-1709.
- [8] WANG J, PANG Y W, HE Y Q, et al. Enhancement for dust-sand storm images[C]//*International Conference on Multimedia Modeling*. Cham: Springer, 2016: 842-849.
- [9] ZHOU R Z, HE J, HONG Z L. Adaptive algorithm of auto white balance for digital camera[J]. *Journal of Computer-Aided Design and Graphics*, 2005, 17(3): 529-533.
- [10] RIZZI A, GATTA C, MARINI D. Color correction between gray world and white patch[J]. *Human Vision and Electronic Imaging*, 2002, 4662: 367-375.
- [11] KWON K J, KIM Y H. Scene-adaptive RGB-to-RGBW conversion using retinex theory-based color preservation[J]. *Journal of Display Technology*, 2012, 8(12): 684-694.
- [12] JOBSON D J, RAHMAN Z, WOODSELL G A. Properties and performance of a center/surround retinex[J]. *IEEE Transactions on Image Processing: A Publication of the IEEE Signal Processing Society*, 1997, 6(3): 451-462.
- [13] JOBSON D J, RAHMAN Z, WOODSELL G A. The statistics of visual representation[J]. *SPIE*, 2002: 25-35.
- [14] FARBMAN Z, FATTAL R, LISCHINSKI D, et al. Edge-preserving decompositions for multi-scale tone and detail manipulation[J]. *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, 2008, 27(3): DOI: 10.1145/1360612.1360666.
- [15] XU R S, TU Z Z, DU Y Q, et al. Pik-fix: Restoring and colorizing old photos[C]//*Proceedings of the IEEE/CVF Winter Conference on Applications of Computer Vision*. New York: IEEE, 2023: 1724-1734.
- [16] LIU C Y. Research on color restoration and enhancement methods for sand and dust images based on deep learning [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2021.
- [17] DONG C, LOY C C, HE K M, et al. Learning a deep convolutional network for image super-resolution[C]//*Computer Vision—ECCV: 13th European Conference*. Zurich: Springer International Publishing, 2014: 184-199.
- [18] 曹虎. 基于深度学习的水下图像超分辨率重建的研究与实现[D]. 北京: 北京邮电大学, 2023.
- CAO H. Research and implementation of underwater image super resolution reconstruction based on deep learning[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2023.
- [19] 杨哲. 基于虚拟曝光技术的低照度图像融合算法研究 [D]. 西安: 西安理工大学, 2020.
- YANG Z. Research on low illumination image fusion algorithm based on virtual exposure technology[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2020.
- [20] DEMIR Y, KAPLAN N H. Low-light image enhancement based on sharpening-smoothing image filter[J]. *Digital Signal Processing*, 2023, 138: 104054.
- [21] REINHARD E, ADHIKHMIM M, GOOCH B, et al. Color transfer between images[J]. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 2001, 21(5): 34-41.
- [22] WELSH T, ASHIKHMIM M, MUELLER K. Transferring color to greyscale images[C]//*Proceedings of the 29th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*. New York: ACM, 2002: DOI:10.1145/566654.566576.
- [23] ZUIDERVELD K. Contrast limited adaptive histogram equalization[J]. *Graphics Gems*, 1994, DOI:10.1016/B978-0-12-336156-1.50061-6.

编辑 税 红