

题号	A
----	---

马赛克瓷砖选色问题

摘要

随着人们生活水平的不断提高，人们对瓷砖的颜色也有了更高的要求。然而，现有的瓷砖颜色色差检测大多数还是以人工为主，容易造成漏检、误检等情况。因此，设计一种瓷砖选色、色差检测对比的算法具有重要的实际意义。

本文主要研究了马赛克瓷砖的选色问题，通过对附件中图像数据的处理，选出与附件图像中每种颜色最接近的瓷砖颜色。由于厂家生产瓷砖的颜色有限，为提升拼接图像的表现力，设计增加部分颜色的瓷砖。此外，生产瓷砖是需要成本的，本文综合考虑瓷砖的成本和表现效果，设计新增颜色种类的瓷砖，并给出相应的 RGB 编码值。

首先，针对附件中的两幅图像，判断出与图像每种颜色最接近的瓷砖颜色。为此，需要对附件所给图像数据及现有瓷砖颜色数据进行可视化处理，以进行颜色近似匹配算法的研究。对于 RGB 图像数据的处理，本文综合考虑 RGB、HSV 及 CIELAB 颜色空间的特性，选择 CIELAB 颜色空间进行颜色近似匹配算法的研究。同时，为判断颜色的相似程度，本文给出了三种相似度的判断方法，但均不能较好的实现颜色近似匹配。因此，本文利用 CIE2000 色差公式进行颜色的近似匹配。此外，本文还对 HSV 颜色空间下距离的计算进行了改进。实验结果证明了本文所提算法的有效性，对附件图像的每种颜色与瓷砖颜色有符合人眼视觉感知的近似匹配。

其次，考虑提升拼接图像的表现力，设计增加瓷砖颜色的策略。基于附件 1 所给的现有瓷砖的 RGB 数据，分别对 R、G、B 三分量进行数据预处理，即对 R、G、B 每间隔 4 个颜色值进行采样，利用 CIE2000 色差公式计算所取点与现有 22 种瓷砖颜色的色差，记录每个点对应的最小色差值，并建模所有采样 RGB 点的最小色差值总和最小化优化问题。基于此，利用 K-means 聚类算法，基于不同的色差值范围聚类，从而可以得到不同色差值的簇类，每个簇类的簇头即为所新增颜色，簇头位置即为新增颜色的 RGB 编码值。通过新增颜色，可以提高色彩的还原度与色彩的均匀度，从而有效提升拼接图像的表现力。

最后，综合考虑研发新颜色瓷砖的成本和表现效果，设计新增瓷砖颜色的策略。由于瓷砖制造成本的限制，新增瓷砖颜色有限，应以最低的制造成本实现最好的表现效果。

因此，本文以降低采样颜色点与现有瓷砖色差的总和为优化目标，定义色差降低速率为当前新增瓷砖颜色降低的色差总和与上一新增瓷砖颜色降低的色差总和之比，在满足瓷砖制造成本及色差降低速率的限制下，建模色差总和最小化优化问题。类似地，利用 K-means 聚类算法，基于不同的色差值范围聚类，得到不同色差值的簇类，即可确定新增的颜色种类及数量，从而实现现有瓷砖颜色均匀性（表现效果较好）及成本可观性。

关键词：瓷砖，颜色匹配，新增颜色，CIELAB 颜色空间，色差降低速率，K-means

目录

一、问题重述	1
1.1 问题背景	1
1.2 本题所给信息及参数	1
1.3 待解决的问题	1
二、问题分析	2
2.1 问题一分析	2
2.2 问题二分析	2
2.3 问题三分析	2
三、模型假设	3
四、符号说明	3
五、颜色空间的选择及色彩相似度表示方法	3
5.1 颜色空间的选择	4
5.1.1 RGB 颜色空间	4
5.1.2 HSV 颜色空间	4
5.1.3 CIELAB 颜色空间	6
5.2 相似度表示方法	7
5.2.1 夹角余弦相似法	7
5.2.2 直方图相交法	8
5.2.3 欧几里得距离法	8
5.2.4 改进的距离法	8
六、问题建模与求解	9
6.1 问题一建模与求解	9
6.1.1 问题一建模	9
6.1.2 问题一求解	10
6.1.3 算法验证	12
6.1.4 问题一结果分析	14
6.2 问题二建模与求解	15
6.2.1 问题二建模	15
6.2.2 问题二求解	16

6.2.3 问题二结果分析	17
6.3 问题三建模与求解	19
6.3.1 问题三建模	19
6.3.2 问题三求解	20
6.3.3 问题三结果分析	20
七、模型评价	23
7.1 模型的优点	23
7.2 模型的不足	23
参考文献	23
附录	25

一、问题重述

1.1 问题背景

瓷砖作为室内外的重要建筑材料，已经在全世界普遍使用。随着人们生活水平不断提高，人们对其质量、美感要求越来越高，而马赛克瓷砖因其尺寸较小，铺设位置、方式较为灵活，可以拼接组合成各种文字图案，具有强装饰性。但因工艺与成本约束，瓷砖颜色有限，在拼接组合过程中需要选择相近色系，进行图案拼接^[1]。

而且目前国内瓷砖色彩检测大多依靠人工检测，成本高，既浪费时间又费体力脑力，并且常因疲劳、分心、人眼区分度低等因素导致判断失误，造成检测错误、遗漏等问题，影响生产效率，降低质量。因此，对于选色检测算法研究的重要性不言而喻，偏色程度大小是衡量瓷砖质量好坏的重要指标^[2]。

1.2 本题所给信息及参数

某马赛克瓷砖生产厂只能生产 22 种颜色的马赛克瓷砖（常见规格为边长不超过 5cm）。为减小客户选色时间及成本，给客户id提供高效的选色方案，厂家需要开发一个可依据原始图片颜色自动找出颜色最接近的瓷砖的软件。因此，须获得确定原始颜色与瓷砖颜色对应关系的算法。假设原始图像为 24 位真彩色格式，即 R、G、B 三个颜色分量均为 8 位，共有 $2^8 \times 2^8 \times 2^8 = 16777216$ 种颜色，对于任何一种指定的颜色，算法输出颜色最相近的瓷砖的颜色编号。题中给出四个附件，附件 1 给出现有的 22 种瓷砖 RGB 值及对应编号；附件 2、3 是两幅原始图像颜色列表（列表信息包含 RGB 值及对应编号），两幅图分别有 216、200 种颜色；附件 4 为选出颜色编号输出格式。

1.3 待解决的问题

在本文中，我们需要根据问题中厂家所给参数和附件所给数据集，建立马赛克瓷砖选色对应关系的数学模型，设计瓷砖颜色近似选择的计算方法，选择出颜色最近的瓷砖颜色编号。本文具体要解决的问题如下：

问题 1：题中给出两幅原始图像颜色列表，分别有 216、200 种颜色（附件 2、附件 3），需选出与每种原始颜色最接近的瓷砖颜色，并将选出的瓷砖颜色的编号按照附件 4 的要求输出至结果文件。

问题 2：由于瓷砖工艺受限，目前厂里只有 22 种颜色，工厂发展需要技术革新，拟研发新颜色瓷砖。抛开研发难度，只考虑拼接图像的表现效果，应该优先研发哪些颜色

的瓷砖？当同时增加 1 种颜色、同时增加 2 种颜色、…、同时增加 10 种颜色时，分别给出对应颜色的 RGB 编码值。

问题 3：假设不论什么颜色，一种新颜色瓷砖的研发成本相同，综合考虑成本和表现效果，建议新增哪几种颜色，说明新增的理由并给出对应的 RGB 编码值。

二、问题分析

2.1 问题一分析

对于**问题 1**，首先根据题目所给信息及数据可知，附件给出两组图像数据，与两组输出数据，仅有附件 1 给出 RGB 值所对应的颜色，因此需要对两组图像数据进行预处理，将图像色彩可视化并找到与之最接近的瓷砖颜色。具体地，首先进行颜色空间的选择，将 RGB 转换成对应的颜色空间坐标，再利用 CIE 2000 色差公式寻找 22 种瓷砖色彩与附件 2、3 每种颜色最小的色差值，最后将匹配后的效果进行可视化处理；此外，通过比较基于 CIE 2000 色差公式与基于加权欧式距离的瓷砖颜色近似算法，得出最优的色彩匹配结果。

2.2 问题二分析

对于**问题 2**，厂家需要研发新的颜色，这样便可有更多的色彩选择空间，在对图案的拼接组合上，可以选择更为相近的颜色进行匹配，图像的表现力更强、还原度更高。为了提高图像拼接的表现力，厂家需要增加部分新颜色的瓷砖。对于增加新颜色的瓷砖，以增强表现力，可理解为提高色彩的还原度与色彩的均匀度。针对附件 1 所给的现有瓷砖的 RGB 数据，分别对 R、G、B 三分量进行数据预处理，即对 R、G、B 每间隔 4 个值进行采样，再利用 CIE2000 色差公式计算所取点与现有 22 种瓷砖颜色的色差，记录每个点对应的最小色差值。基于此，利用 K-means 聚类算法，基于不同的色差值范围聚类，从而可以得到不同色差值的簇类。因此，可以求得同时增加哪些颜色。

2.3 问题三分析

对于**问题 3**，在第二问的基础上，综合考虑瓷砖制造成本与表现力两方面，新增瓷砖颜色。由于瓷砖制造成本的限制，新增瓷砖颜色有限，应以最低的制造成本实现最好的表现效果。此外，从用户需求的角度考虑，假设用户对每种颜色瓷砖的需求量是相同的。因此，本文以降低所取颜色点与现有瓷砖色差的总和为目标，以色差降低速率为性能度量指标，即色差降低速率低于一定门限值时，即可确定新增的颜色种类及数量，从

而实现现有瓷砖颜色均匀性（表现效果较好）及成本可观性。

三、模型假设

- 1) 假设用户对每种颜色瓷砖的需求量相同；
- 2) 假设瓷砖 RGB 颜色的变化是连续的；
- 3) 假设每块瓷砖的颜色均匀，即一块瓷砖上只有一种颜色；
- 4) 假设研发新颜色瓷砖的成本是有限的。

四、符号说明

符号	符号说明
N	附件图像的颜色数量
N_j	第 j 个现有瓷砖颜色
$\Delta E_{i,j}$	第 i 个颜色与第 j 个现有瓷砖颜色的色差
ΔE_i^{\min}	第 i 个颜色与现有瓷砖颜色的最小色差
\mathbf{P}_k	第 k 个簇头位置
w_m	第 m 个颜色点的位置
c_l	第 l 个簇类
$N(c_l)$	第 l 个簇类的颜色数量
Q	新增颜色的种类数
C_0	研发一种新颜色瓷砖的成本
C^{\max}	研发新颜色瓷砖的成本上限
V	色差降低速率
V^{\min}	色差降低速率门限值

五、颜色空间的选择及色彩相似度表示方法

颜色空间是通过颜色数据化，实现颜色的表现、处理和分析的一类数学方法。其只有在统一的颜色规范框架内，才能准确的分析和处理颜色信息。因此，在实现原始颜色与瓷砖颜色对应关系的算法时，选取一个恰当的颜色空间，是实现原始颜色与瓷砖颜色近似匹配的第一步。

5.1 颜色空间的选择

为了正确地描述和分析颜色，需要建立颜色模型，然而现有颜色模型均不能够解决所有的颜色分析问题。因此，针对瓷砖的颜色进行分析和量化时，常常需要转换到不同的颜色空间。目前，常用的颜色空间模型可分成两类，一类是面向彩色显示器或打印机等硬件设备，另一类面向颜色分析和处理的应用研究。面向硬件设备的最常用颜色模型是 RGB 颜色空间模型，面向色彩处理的最常用的是 HSV 颜色空间模型，而面向颜色色差处理的 Lab 均匀颜色空间模型在色差检测方面也得到了广泛的应用。以下分别对这三种颜色空间模型进行简要分析。

5.1.1 RGB 颜色空间

RGB 是目前工业界的一种标准颜色空间，也称之为加色法混色模型空间。它以红 R(Red)、绿 G(Green)、蓝 B(Blue)三种颜色为基础^[3,4]，通过 R、G、B 三原色不同程度的相互叠加，几乎可以产生人眼所能看到的所有颜色。该颜色空间中的任意颜色均可以采用公式(5.1)表示：

$$C = R(r) + G(g) + B(b) \quad (5.1)$$

由于 RGB 颜色表示方法简单明了，因此在摄像机和显示器等硬件设备上有着广泛的应用。然而，R、G、B 三通道分量彼此间相关性较强，若直接通过 R、G、B 三通道分量进行原始颜色与瓷砖颜色近似匹配，很难达到预期效果。此外，RGB 模型获取色彩的方式与人眼的感知差异较大。因此，在实际应用中，需要根据不同需求，将该颜色空间转换到其他不同颜色空间进行处理。RGB 颜色空间如图 5.1 所示：

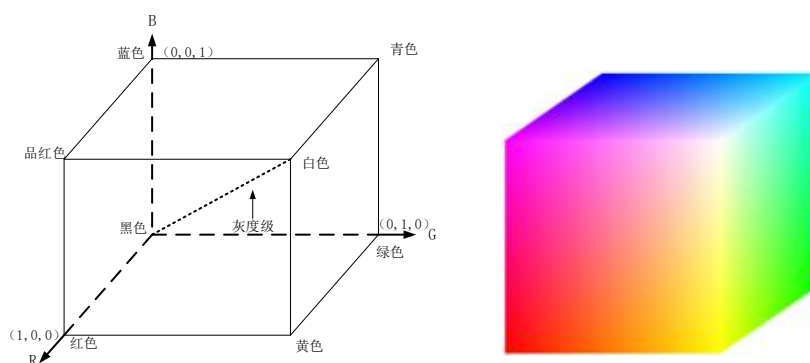


图 5.1 RGB 颜色空间

5.1.2 HSV 颜色空间

与 RGB 颜色空间不同，HSV 颜色空间的尺度符合人类对颜色的感知程度的规律。HSV 颜色空间由 H(Hue)色相，S(Saturation)饱和度和 V(Value)亮度三个分量组成，它也

被称作六角锥体模型^[5]。其中，色调是颜色的外观，通过角度描述且受光波波长影响；饱和度表示物体颜色的纯度，同样受可见光波长影响；亮度则表示物体呈现的明暗程度。HSV 颜色空间的最大特点是 H、S、V 三个分量之间相互独立，使图像颜色分割的鲁棒性更好。

HSV 颜色空间模型如图 5.2 所示。其中，H 分量的取值范围是从 0 度到 360 度之间，S 分量的取值范围是从 0 到 1 之间，V 分量的取值范围也是从 0 到 1 之间。六棱锥的底点 V=0，表示纯黑色；锥体的顶面中心处 V=1，表示纯白色。三维模型的 S 分量从锥体的中轴线到锥体表面点的水平距离表示饱和度的纯度，中轴线上的 S=0，表示饱和度为 0%，也即灰色；锥体表面点距离中轴线的距离越远其饱和程度越强，当 S=1 时达到完全饱和 100% 状态。色调 H 由 V 轴的旋转角给定，沿着圆周逆时针转，当 H=0° 时，表示图中的红色，H=60° 时，表示图中的黄色，以此类推 H 的不同取值便代表着不同的颜色。由此可见，HSV 是一种直观的颜色模型，通过设定 H 值的划分阈值，即可对 RGB 颜色空间进行颜色的划分。

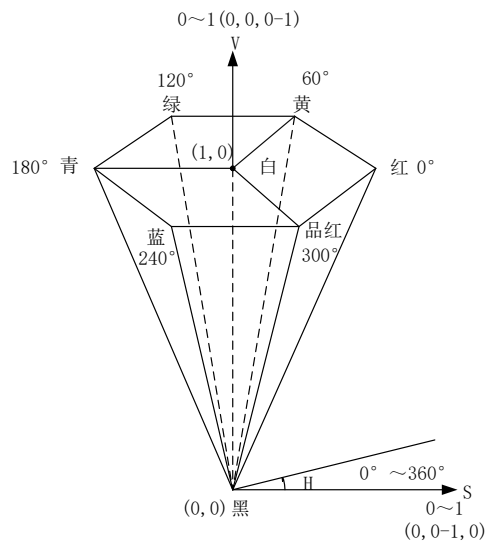


图 5.2 HSV 颜色空间

以下将 RGB 转化到 HSV，首先对 R、G、B 做归一化处理，使其取值在 0 到 1 之间，即 $R = \frac{r}{255}$ ， $G = \frac{g}{255}$ ， $B = \frac{b}{255}$ ，其中， r ， g ， b 分别为 RGB 颜色空间的红、绿、蓝三个分量。因此，RGB 空间到 HSV 颜色空间的转换关系可以表示为：

$$V = \max(R, G, B) \quad (5.2)$$

$$S = \begin{cases} \frac{\max(R, G, B) - \min(R, G, B)}{\max(R, G, B)}, & V \neq 0 \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (5.3)$$

$$H = \begin{cases} 60 \times (G - B) / (S \times V), & \text{若 } \max(R, G, B) = R \\ 60 \times [2 + (B - R) / (S \times V)], & \text{若 } \max(R, G, B) = G \\ 60 \times [4 + (B - G) / (S \times V)], & \text{若 } \max(R, G, B) = B \\ H + 360, & H < 0 \end{cases} \quad (5.4)$$

由式(5.2)可知，V 分量的大小只与 R、G、B 三个分量取值的最大值有关，不存在使其没有意义的颜色。从式(5.3)可以看出，当 R=G=B=0 时，S 无任何意义。当且仅当 R、G、B 三个分量不全为 0 时，S=1 才能达到 100%的饱和；当 R=G=B≠0 时，S=0 表示饱和度为 0%。由式(5.4)可知，H 分量的值取决于 R、G、B。

5.1.3 CIELAB 颜色空间

CIELAB 颜色空间也称之为 lab 颜色空间，其颜色空间模型如图 5.3 所示。其中，L 表示亮度，取值范围为[0,100]；a，b 表示色度，取值范围均为[-127,127]。a 从绿色负轴指向红色正轴；b 从蓝色负轴指向黄色正轴。

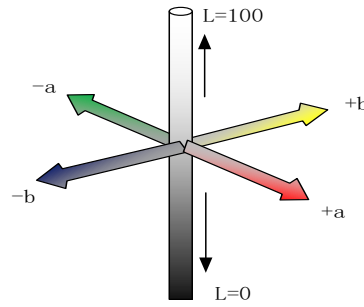


图 5.3 CIELAB 颜色空间

实际应用中，数字图像大多以 RGB 数据格式进行存储，因此需要通过 CIE XYZ 系统将 RGB 和 CIE LAB 颜色空间相互转换，RGB 和 CIE XYZ 之间的线性变换如公式(5.5)所示：

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.412453 & 0.357580 & 0.180423 \\ 0.21267 & 0.715160 & 0.072169 \\ 0.019334 & 0.119196 & 0.950227 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} \quad (5.5)$$

CIE LAB 可由 XYZ 通过以下转换得到：

$$L = \begin{cases} 116 \times \left(\frac{Y}{Y_0} \right)^{1/3} - 16, & \frac{Y}{Y_0} > 0.008856 \\ 903.3 \times \frac{Y}{Y_0}, & \text{其他} \end{cases} \quad (5.6)$$

$$A = 500 \times \left[\left(\frac{X}{X_0} \right)^{1/3} - \left(\frac{Y}{Y_0} \right)^{1/3} \right] \quad (5.7)$$

$$B = 200 \times \left[\left(\frac{Y}{Y_0} \right)^{1/3} - \left(\frac{Z}{Z_0} \right)^{1/3} \right] \quad (5.8)$$

其中, X_0 、 Y_0 、 Z_0 是标准白光对应的 X 、 Y 、 Z 值, L 为亮度值; A 为红绿坐标, B 为黄蓝坐标; A 坐标正方向偏红, 负方向偏绿, B 坐标正方向偏黄, 负方向偏蓝。若存在两个色样, 色样 1 和色样 2, 其 CIELAB 颜色空间分别为 L_1 , L_2 , A_1 , A_2 , B_1 , B_2 , 则色样 1 与色样 2 之间的色差可以表示为:

$$\Delta E = \sqrt{(L_1 - L_2)^2 + (A_1 - A_2)^2 + (B_1 - B_2)^2} \quad (5.9)$$

通过对以上三张颜色空间的分析可知: RGB 颜色空间属于不均匀颜色空间, 各颜色分量(R, G, B)的相关性较强, 不适合原始颜色与瓷砖颜色的近似匹配。HSV 颜色空间的三个分量, 比较符合人眼对颜色的感知。然而, 使用 HSV 空间计算距离时, 仍然存在的问题。比如, 在接近六棱锥底点的地方, 无论 H 色调为何值, 颜色基本都接近黑色; 在六棱锥顶面的中心或者 S 饱和度接近 0 时, 无论 H 色调为何值, 颜色基本都接近灰色; 当饱和度 S 较大, 且 V 亮度较大时, H 色调的微弱改变, 往往会让整体的颜色产生巨大变化。CIELAB 颜色空间属于均匀颜色空间, 可通过两点之间的距离度量颜色差值, 而且该空间与设备无关, 是颜色近似匹配比较适合的颜色空间。因此, 本文选取 CIELAB 颜色空间, 进行原始颜色与瓷砖颜色对应关系的算法研究。

5.2 相似度表示方法

通过计算原始颜色与瓷砖颜色的相似程度, 即可完成原始颜色与瓷砖颜色的近似匹配。目前常用的相似度检测方法有: 夹角余弦相似法、直方图相交法和欧几里得距离法(欧氏距离法), 在选择相似度公式进行计算的时候应遵守两个原则: 相似度的检测要与人眼的视觉相符合、计算简便且运行快。以下将分别对这几种相似度检测的方法进行介绍。

5.2.1 夹角余弦相似法

夹角余弦相似法就是将所要比较的两幅图像转化成两个向量的形式, 然后再计算两个向量的余弦值来判断两幅图像是否相似。假设图像 A 的向量为 m_A , 图像 B 的向量为

m_B , 则 $A = \sqrt{\sum_{i=1}^k m_A^2}$, $B = \sqrt{\sum_{i=1}^k m_B^2}$, $C = \sum_{i=1}^k m_A m_B$, m_A 与 m_B 的夹角余弦值 $\cos \theta$ 可以表

示为:

$$\cos \theta = \frac{C}{\sqrt{AB}}, -1 \leq \cos \theta \leq 1 \quad (5.10)$$

当两向量的夹角 $\theta = 0$ 时, 即 $\cos \theta = 1$, 表示两张图像百分之百相似; 当两条向量的夹角的值 $\theta = 90^\circ$ 时, 即 $\cos \theta = 0$, 表示两张图像完全不相似; 当两条向量的夹角的值 $\theta = 180^\circ$ 时, 即 $\cos \theta = -1$, 表示两张图像方向相反。这样即可通过比较两向量夹角的大小来判断图像的相似程度, 夹角越小就表示图像越相似。然而, 夹角余弦相似法不能实现原始颜色与瓷砖颜色的近似匹配。

5.2.2 直方图相交法

直方图相交法是指计算所采集到的两幅图像直方图之间的像素重合的数目。假设图像 A 与图像 B 的灰度直方图分别为 I_1 、 I_2 , 则图像 A 与图像 B 的灰度直方图重合的数目 $D(I_1, I_2)$ 可表示为:

$$D(I_1, I_2) = \sum_{i=1}^n \min(I_1(i), I_2(i)) \quad (5.11)$$

式中, n 表示两幅图像的灰度直方图分别有 n 个灰度级。

5.2.3 欧几里得距离法

欧式距离法是一种采用距离大小的形式来衡量 n 维空间中两个点之间真实距离的方法, 也常用于度量颜色空间中颜色的相似度的问题。假设 n 维空间中两个采样点分别以向量 α_i 和 β_i 表示, 则两个采样点之间的距离表示为:

$$d(\alpha_i, \beta_i) = \sqrt{\sum_{i=1}^n (\alpha_i - \beta_i)^2} \quad (5.12)$$

式中, n 表示向量的维数。当两向量之间的欧式距离 $d(\alpha_i, \beta_i)$ 越小时, 两采样点的颜色就越相似, 反之越不相似。

5.2.4 改进的距离法

对于 HSV 颜色空间模型, 其六棱锥的底点处与顶点平面处的距离变化对整体颜色的影响程度不同, 导致颜色变化不同。虽然 HSV 颜色空间比较符合人眼对颜色的感知, 但在 HSV 颜色空间计算距离时, 仍不能很好表现颜色的变化程度。通常情况下, HSV 颜色空间中, 假设六棱锥底面近似为圆, 其半径为 r , 高为 h , 以地面圆心为原点, $H = 0$

为 x 轴正方向建立坐标轴，则色值为 (H, S, V) 的点的三维坐标 (x, y, z) 可以表示为：

$$x = rVS \cos H \quad (5.13)$$

$$y = rVS \sin H \quad (5.14)$$

$$z = h(1-V) \quad (5.15)$$

则 HSV 颜色空间中，两个不同色值点的距离可以计算为：

$$d^{\text{HSV}} = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2 + (z_1 - z_2)^2} \quad (5.16)$$

由于 HSV 颜色空间模型底点处与顶点平面处的距离变化对整体颜色的影响程度不同，如表 5.1 所示。为解决该问题，本文对 HSV 颜色空间中的距离计算方法进行改进，即：

$$d^{\text{Modify}} = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2} [\max(z_1, z_2)] + (z_1 - z_2)^2 \quad (5.17)$$

基于式(5.17)在 HSV 颜色空间计算不同色值点的距离，可有效改善距离变化对整体颜色的影响程度。

表 5.1 HSV 颜色空间不同 V 值对颜色的影响

H 与 S 的差值	V1 与 V2 的值	颜色差距大小
大	两个都大	大
大	两个都小	小
大	一大一小	大
小	两个都大	小
小	两个都小	小
小	一大一小	大

六、问题建模与求解

6.1 问题一建模与求解

为了找出与（附件中）每种颜色最接近的瓷砖颜色，本小节首先将（附件中）每种颜色以及瓷砖颜色的 RGB 图像数据转换到 CIELAB 颜色空间，进而通过 CIE2000 色差公式判断每种颜色与瓷砖颜色的差异，从而匹配出与每种颜色最接近的瓷砖颜色。

6.1.1 问题一建模

假设以 N 表示附件图像的颜色数量，令 R_i 为图像第 i 个颜色的 R 颜色， G_i 为图像第 i 个颜色的 G 颜色， B_i 为图像第 i 个颜色的 B 颜色， $1 \leq i \leq N$ 。因此，基于式(5.5)，附件

图像 RGB 和 CIE XYZ 之间的线性变换可以表示为:

$$\begin{bmatrix} X_i \\ Y_i \\ Z_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.412453 & 0.357580 & 0.180423 \\ 0.21267 & 0.715160 & 0.072169 \\ 0.019334 & 0.119196 & 0.950227 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_i \\ G_i \\ B_i \end{bmatrix}, 1 \leq i \leq N \quad (6.1)$$

标准白光对应的 X_0 、 Y_0 、 Z_0 值计算如下:

$$\begin{bmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.412453 & 0.357580 & 0.180423 \\ 0.21267 & 0.715160 & 0.072169 \\ 0.019334 & 0.119196 & 0.950227 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 255 \\ 255 \\ 255 \end{bmatrix} \quad (6.2)$$

因此, CIELAB 颜色空间可由 XYZ 通过以下转换得到:

$$L_i = \begin{cases} 116 \times \left(\frac{Y_i}{Y_0} \right)^{1/3} - 16, \frac{Y_i}{Y_0} > 0.008856 \\ 903.3 \times \frac{Y_i}{Y_0}, \text{其他} \end{cases}, 1 \leq i \leq N \quad (6.3)$$

$$A_i = 500 \times \left[\left(\frac{X_i}{X_0} \right)^{1/3} - \left(\frac{Y_i}{Y_0} \right)^{1/3} \right], 1 \leq i \leq N \quad (6.4)$$

$$B_i = 200 \times \left[\left(\frac{Y_i}{Y_0} \right)^{1/3} - \left(\frac{Z_i}{Z_0} \right)^{1/3} \right], 1 \leq i \leq N \quad (6.5)$$

6.1.2 问题一求解

由于人眼与色差计在色度图中不同位置的色彩评估方法和形状上的差异,引起了许多色彩评定时测量数据与目测结论不匹配的问题。为此, CIE2000 色差公式在原色差计算公式基础上, 另外新增了三个权重系数 S_L , S_C 和 S_H [6], 以重新定义色差计算方法, 使得色差计算值与人眼评估更为接近。假设以 N_j 表示第 j 个现有瓷砖颜色, $1 \leq j \leq 22$, 则 CIE2000 色差公式表示为如下:

$$\Delta E_{i,j} = \sqrt{\left(\frac{\Delta L'_{i,j}}{K_L S_L} \right)^2 + \left(\frac{\Delta C'_{i,j}}{K_C S_C} \right)^2 + \left(\frac{\Delta H'_{i,j}}{K_H S_H} \right)^2} + R^T \left(\frac{\Delta C'_{i,j}}{K_C S_C} \right) + \left(\frac{\Delta H'_{i,j}}{K_H S_H} \right), 1 \leq i \leq N \quad (6.6)$$

式中, $\Delta E_{i,j}$ 表示第 i 个颜色与第 j 个现有瓷砖颜色的色差。CIE2000 色差公式的计算过程及各参数意义如下:

步骤一: 在 CIELAB 颜色空间中基于式(6.3)- (6.5)计算 L_i , A_i , B_i 及 C_i^{AB} 。

$$C_i^{AB} = \sqrt{(A_i)^2 + (B_i)^2}, 1 \leq i \leq N \quad (6.7)$$

步骤二：计算 L'_i ， A'_i ， B'_i ， C'_i 及 h'_i 。

$$\begin{cases} L'_i = L_i \\ A'_i = (1+G) \times A_i \\ B'_i = B_i \\ C'_i = \sqrt{(A'_i)^2 + (B'_i)^2} \\ h'_i = \arcsin(B'_i / A'_i) \end{cases}, 1 \leq i \leq N \quad (6.8)$$

其中， $G = 0.5 \times \left(1 - \sqrt{\frac{(C_i^{AB})^7}{(\bar{C}_i^{AB})^7 + 25^7}} \right)$ ，表示 CIELAB 颜色空间轴的调整因子。 \bar{C}_i^{AB} 是 C_i^{AB} 的算术平均值。

步骤三：计算亮度差 $\Delta L'_{i,j}$ ，饱和度差 $\Delta C'_{i,j}$ 及色调差 $\Delta H'_{i,j}$ 。

$$\Delta L'_{i,j} = L'_i - L'_j, 1 \leq i \leq N, 1 \leq j \leq 22 \quad (6.9)$$

$$\Delta C'_{i,j} = C'_i - C'_j, 1 \leq i \leq N, 1 \leq j \leq 22 \quad (6.10)$$

$$\Delta H'_{i,j} = 2\sqrt{C'_i C'_j} \times \sin\left(\frac{\Delta h'_{i,j}}{2}\right), 1 \leq i \leq N, 1 \leq j \leq 22 \quad (6.11)$$

其中， $\Delta h'_{i,j} = h'_i - h'_j$ 。

步骤四：计算 S_L ， S_C ， S_H 及 R^T 。

$$S_L = 1 + \frac{0.015(\bar{L}' - 50)^2}{\sqrt{20 + (\bar{L}' - 50)^2}} \quad (6.12)$$

$$S_C = 1 + 0.045\bar{C}' \quad (6.13)$$

$$S_H = 1 + 0.015\bar{C}'T \quad (6.14)$$

其中， \bar{L}' 为 L'_i 与 L'_j 的算术平均值； \bar{C}' 为 C'_i 与 C'_j 的算术平均值；式(6.14)中， T 可以表示为：

$$T = 1 - 0.017 \cos(\bar{h}' - 30^\circ) + 0.24 \cos(2\bar{h}') + 0.32 \cos(3\bar{h}' + 6^\circ) + 0.20 \cos(4\bar{h}' - 63^\circ) \quad (6.15)$$

其中， \bar{h}' 为 h'_i 与 h'_j 的算术平均值。

式(6.6)中， R^T 可以表示为：

$$R_T = -\sin(2\Delta\theta)R_C \quad (6.16)$$

其中, $\Delta\theta = 30 \exp\left\{-\left[\left(\bar{h}' - 275^\circ\right)/25\right]^2\right\}$, 是由色调决定的旋转角; $R_C = 2\sqrt{\frac{(\bar{C}')^7}{(\bar{C}')^7 + 25^7}}$ 为旋转幅度。

步骤五: K_L , K_C 及 K_H 的选择。

参数因子 K_L , K_C 及 K_H 是与使用条件相关的校正系数, 它们是影响着色差感觉的因素。在 CIE 给定的标准观测条件下, $K_L = K_C = K_H = 1$, 条件不符合时, 则要根据工业色差评估条件来确定这些数值。

步骤六: 代入式(6.6)中计算色差。

基于上述所得的 $\Delta E_{i,j}$, 需要计算每个颜色与现有瓷砖颜色的最小色差。令 ΔE_i^{\min} 表示第 i 个颜色与现有瓷砖颜色的最小色差, 则 ΔE_i^{\min} 可以表示为:

$$\Delta E_i^{\min} = \min_{j \in [1, 22]} \{\Delta E_{i,j}\} \quad (6.17)$$

$$j = \arg \min_{j \in [1, 22]} \{\Delta E_{i,j}\} \quad (6.18)$$

式(6.18)所求结果即为第 i 个颜色与现有瓷砖颜色色差最小时现有瓷砖的编号 j , 由此可以找出与附件图像中每种颜色最接近的瓷砖颜色。

6.1.3 算法验证

为了说明本文使用算法的有效性, 本小节对算法进行验证。图 6.1-图 6.3 给出了本文所用算法与其他基准算法对图像颜色近似的结果对比。从图中可以看出, 基于 CIE2000 色差公式进行颜色近似得到的效果最好, 因此, 本文采用基于 CIE2000 色差公式进行瓷砖颜色的近似匹配及增色设计。



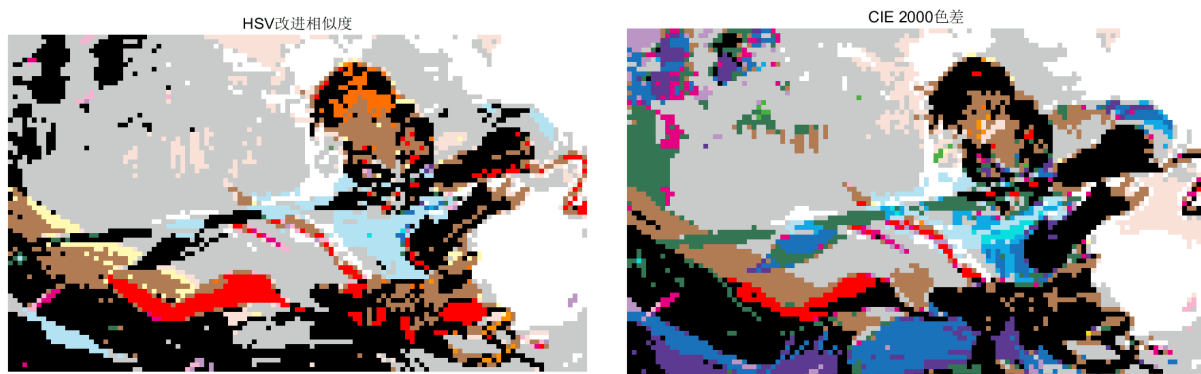


图 6.1 算法验证（卡通人物图）

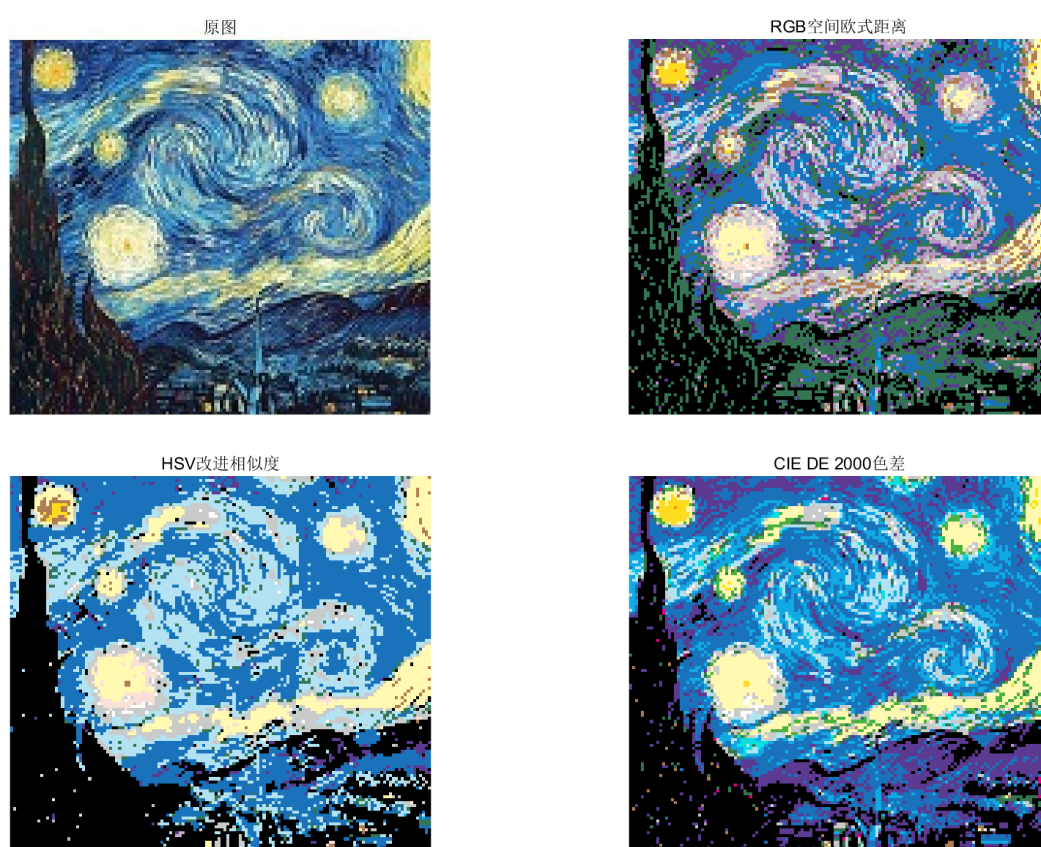


图 6.2 算法验证（星空图）





图 6.3 算法验证（电影人物图）

6.1.4 问题一结果分析

本小节给出了与图像 1、图像 2 中每种颜色最接近的瓷砖颜色结果。此外，为了对比不同方法对瓷砖颜色近似匹配的效果，本文还给出了基于加权欧式距离法的瓷砖颜色近似匹配，其距离计算如下：

$$d = \sqrt{\left(2 + \frac{\bar{r}}{256}\right) \times \Delta R^2 + 4 \times \Delta G^2 + \left(2 + \frac{255 - \bar{r}}{256}\right) \times \Delta B^2} \quad (6.19)$$

其中， $\bar{r} = \frac{G_{1,R} + G_{2,R}}{2}$ ， $G_{1,R}$ ， $G_{2,R}$ 分别为两种对比样本的 R 颜色值， ΔR 表示两种对比样本 R 颜色的差值， ΔG 表示两种对比样本 G 颜色的差值， ΔB 表示两种对比样本 B 颜色的差值。

图 6.4-图 6.6 分别给出了原始图像 1 的效果图，基于 CIE2000 色差公式的瓷砖颜色近似效果以及基于加权欧式距离的瓷砖颜色近似效果。可以看出，图 6.5 中对原始图像与瓷砖颜色近似匹配的效果符合人眼视觉对颜色的感知，近似结果较为准确。而对于图 6.6 中基于加权欧式距离的瓷砖颜色近似效果，少量位置出现了不符合人眼视觉感知的颜色匹配（如第三段黑色），近似结果相对来说稍低。



图 6.4 原始图像 1



图 6.5 图像 1 基于 CIE2000 色差公式的瓷砖颜色近似



图 6.6 图像 1 基于加权欧式距离的瓷砖颜色近似

图 6.7-图 6.9 分别给出了原始图像 2 的效果图，以及基于两种近似方法的匹配效果图。可以看出，图 6.8 对原始图像 2 的瓷砖匹配效果较好，匹配颜色符合人眼视觉感知。图 6.9 中仍存在少量位置的颜色变化过于突变，不符合人眼视觉效果。

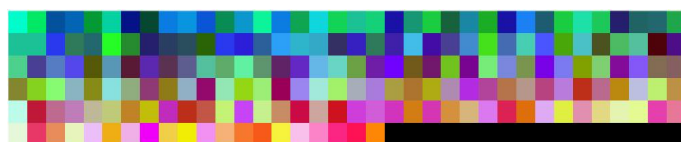


图 6.7 原始图像 2



图 6.8 图像 2 基于 CIE2000 色差公式的瓷砖颜色近似



图 6.9 图像 2 基于加权欧式距离的瓷砖颜色近似

CIE2000 进一步改善了色差评价的视觉一致性，是目前发展最为完善的色差公式，其色差精确性高达 95%，比较接近人眼效果。基于加权欧式距离的色差计算公式的匹配效果也较为准确，但存在某些位置的颜色变化与人眼视觉感知差距较大。

6.2 问题二建模与求解

本小节基于附件 1 所给的现有瓷砖的 RGB 数据，分别对 R、G、B 三分量进行数据预处理，分别将 R、G、B 每间隔 4 个值取一个点，利用 CIE2000 色差公式计算所取点与现有 22 种瓷砖颜色的色差，记录每个点对应的最小色差值。基于此，利用 K-means 聚类算法，基于不同的色差值范围聚类，从而可以得到不同色差值的簇类。因此，可以得到同时增加哪些不同种的颜色。

6.2.1 问题二建模

1. 初始化新增颜色目标点

由于问题 2 中，对于新增颜色的点应为 $2^8 \times 2^8 \times 2^8$ 个点，为减少运算的复杂度且不是一般性，本文分别将 R、G、B 每间隔 4 个值取一个点，即 $R = 1, 5, 9, \dots, 251, 255$ ，G 与 B 的取值类似于 R，则总共初始化 $64 \times 64 \times 64 = 262144$ 个点。

2. 计算色差

利用 CIE2000 色差公式计算所取新增颜色点与现有 22 种瓷砖颜色的色差，并记录每个点对应的最小色差值。令 R_m^a 为第 m 个新增颜色的 R 颜色， G_m^a 为第 m 个新增颜色的 G 颜色， B_m^a 为第 m 个新增颜色的 B 颜色， $1 \leq m \leq 262144$ 。将 R_m^a 、 G_m^a 、 B_m^a 代入式(6.1)中进行 CIE XYZ 线性变换；基于式(6.2)-式(6.16)计算新增颜色的色差 $\Delta E_{m,j}^a$ ， $1 \leq m \leq 262144$ ， $1 \leq j \leq 22$ ；基于式(6.17)求出新增颜色的最小色差值 ΔE_m^{\min} ， $1 \leq m \leq 262144$ 。

3. 优化模型建模

基于上述计算的新增颜色的最小色差值 ΔE_m^{\min} ，建立色差最小化优化模型。显然地，应尽可能降低每个新增颜色的最小色差值 ΔE_m^{\min} ，以提升拼接图像的表现力，本文以最小化所有新增颜色的 ΔE_m^{\min} 的总和为优化目标，建立如下优化模型：

$$\min \sum_{m=1}^{262144} \Delta E_m^{\min} \quad (6.20)$$

以下通过利用 K-means 均值聚类算法对该问题进行求解。

6.2.2 问题二求解

由于使用 K-means 聚类算法前，需要确定聚类的个数 K ，而问题 2 要求分别给出同时增加 1, 2, 3...、10 种颜色的 RGB 值，则本文以同时增加的颜色种类作为聚类的个数。同时，对于每个簇，其簇头初始化为 $[\max\{\Delta E_m^{\min}\}, \max\{\Delta E_m^{\min}\} - k]$ 范围内色差值最小的颜色点， $1 \leq m \leq 262144$ ， k 表示第 k 个簇头。对每个新增颜色点，计算其与簇头的欧式距离，将每个新增颜色点分配到与其距离最近的簇头，直到所有新增颜色点分配完成，从而形成簇。紧接着，对每个簇类的簇头位置进行更新，对簇类所有颜色点的位置进行求和再平均，以更新簇头位置。重复以上步骤，直到簇头位置不再发生变化为止。此时，每个簇头的 RGB 值即为增加颜色对应的 RGB 编码值。基于 K-means 聚类的颜色增加步骤总结如下：

步骤一：初始化 K 个簇头位置 $\mathbf{P}_1, \mathbf{P}_2, \dots, \mathbf{P}_k$ 。

步骤二：根据当前的簇类中心确定每个新增颜色点所属的类。

计算新增颜色点离每个簇头 \mathbf{P}_k 的距离： $d_{mk} = \|\mathbf{w}_m - \mathbf{P}_k\|$ ，其中， \mathbf{w}_m 为第 m 个颜色点

的位置，将新增颜色点分配到距离最近的簇类，直到所有颜色点分配完成。

步骤三：更新每个簇类的类中心，即簇头位置。

对于每个簇类，根据步骤二的分配方案更新每个簇类的中心： $\mathbf{P}_k = \frac{1}{N(c_l)} \sum_{m \in c_l} \mathbf{w}_m$,

其中 c_l 表示第 l 个簇类， $N(c_l)$ 为第 l 个簇类的颜色数量，重复该步骤直到所有簇类的簇头中心位置完成更新。

步骤四：重复步骤二、三，直到簇头位置不再变化或达到最大迭代次数位置。

基于以上步骤，为实现拼接图像的较好表现力，即需要使颜色点与瓷砖的颜色色差较小，则可根据每个簇头的 RGB 值确定新增颜色的对应的 RGB 编码值，从而有效降低颜色点的色差，使得拼接图像有更好的表现力。

6.2.3 问题二结果分析

图 6.10 给出了采样点颜色与现有瓷砖颜色色差值的切片图。图中红色的点表示现有瓷砖颜色 RGB 值的三维空间分布。图中蓝色区域表示色差值较小的采样点区域，黄色区域表示色差值较大的采样点区域。从图中可以看出，离现有瓷砖颜色越近的区域，图中颜色更偏向于蓝色，色差值更小。离现有瓷砖颜色越远的区域，图中颜色更偏向于黄色，色差值更大。

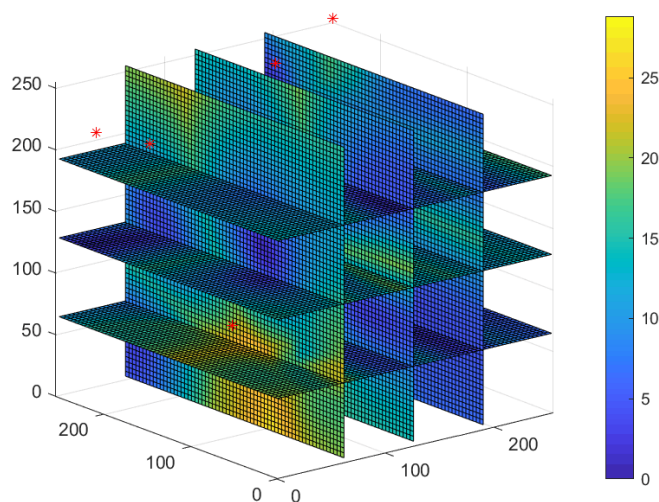


图 6.10 采样点颜色与现有瓷砖颜色色差值的切片图

图 6.11 给出了不同色差值对应的采样点数量图。从图中可以看出，大部分采样点的色差值集中于 5-20 之间，最大的色差值不超过 30。因此，需要先在色差值大的区域增加瓷砖颜色，以最大程度提升拼接图像的表现力。

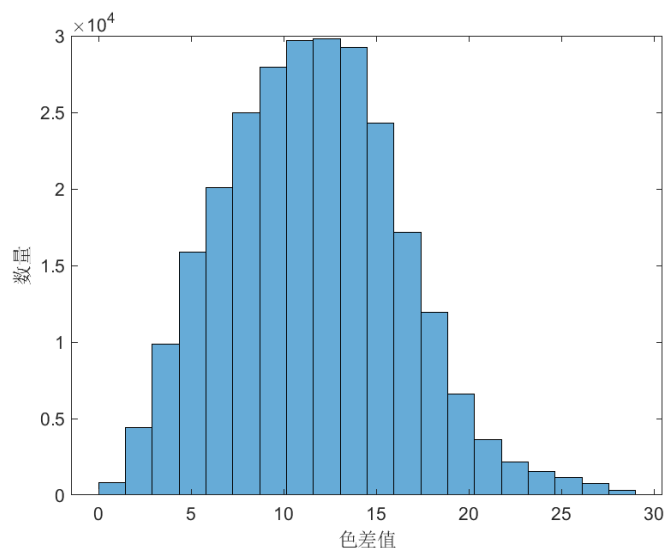


图 6.11 采样点数量与色差值的关系图

图 6.12 给出了不同聚类个数对应的采样点分布图。对于簇头数目为 2、4、6 的情况，分别设定其聚类阈值为 20、17、13，即每个簇类采样点的色差都大于其阈值。从图中可以看出，聚类个数较少时，即聚类阈值较大时，色差大的采样点数目较少，可以优先考虑增加聚类个数较少时对应的瓷砖颜色。聚类个数较多时，即聚类阈值较小时，采样点数目较多，增加瓷砖颜色对图像表现力的提升速率影响减弱。

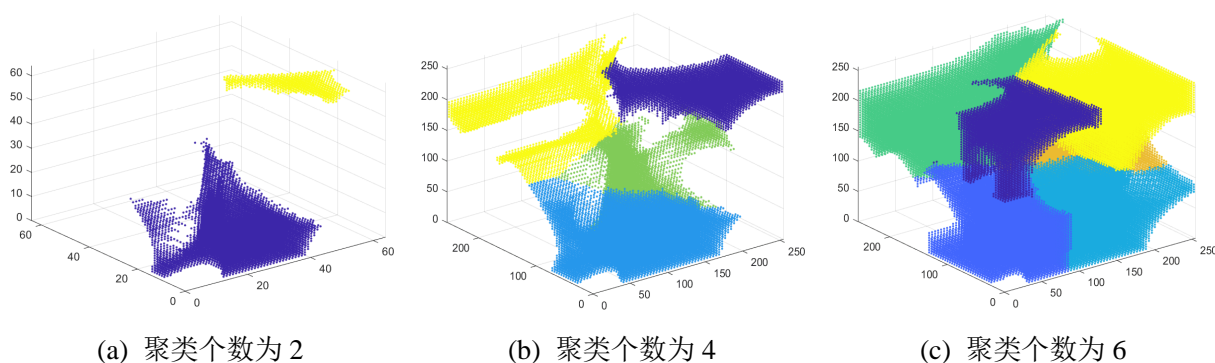


图 6.12 不同聚类个数对应的采样点分布图

根据不同聚类个数所得结果，可以求得同时增加不同种瓷砖颜色对应的 RGB 值。其结果如表 6.1 所示。

表 6.1 同时增加不同种瓷砖颜色对应的 RGB 值

同时增加 1 种 瓷砖颜色所对 应的 RGB 值	同时增加 2 种 瓷砖颜色所对 应的 RGB 值	同时增加 3 种 瓷砖颜色所对 应的 RGB 值	同时增加 4 种 瓷砖颜色所对 应的 RGB 值	同时增加 5 种 瓷砖颜色所对 应的 RGB 值
80, 32, 23	77, 38, 29	83, 65, 38	104, 59, 38	95, 38, 32
	137, 44, 188	77, 23, 23	83, 143, 122	137, 50, 176
		137, 44, 188	140, 47, 176	74, 152, 131
			47, 32, 32	119, 98, 68
				32, 38, 38
同时增加 6 种	同时增加 7 种	同时增加 8 种	同时增加 9 种	同时增加 10 种

瓷砖颜色所对应的 RGB 值	瓷砖颜色所对应的 RGB 值	瓷砖颜色所对应的 RGB 值	瓷砖颜色所对应的 RGB 值	瓷砖颜色所对应的 RGB 值
44, 38, 173	134, 110, 68	41, 146, 116	128, 161, 137	125, 35, 47
140, 50, 164	38, 47, 44	134, 113, 59	146, 44, 161	167, 98, 101
35, 47, 44	116, 146, 140	95, 89, 152	35, 32, 155	38, 35, 149
77, 149, 128	44, 41, 164	41, 50, 44	122, 119, 38	38, 152, 113
107, 41, 41	38, 146, 113	152, 47, 158	164, 101, 98	92, 101, 167
137, 110, 74	116, 38, 44	35, 32, 158	41, 50, 44	143, 41, 158
	143, 50, 161	134, 155, 131	122, 35, 50	38, 50, 41
		119, 35, 47	92, 92, 149	83, 89, 92
			38, 149, 116	134, 161, 134
				131, 128, 35

6.3 问题三建模与求解

在第二问的基础上，综合考虑瓷砖制造成本与表现效果，新增瓷砖颜色。基于 6.2.1 中对于新增颜色的初始化，类似地，本文以降低采样颜色点与现有瓷砖色差的总和为优化目标，定义色差降低速率为当前新增瓷砖颜色降低的色差总和与上一新增瓷砖颜色降低的色差总和之比，在满足瓷砖制造成本及色差降低速率的限制下，建模色差总和最小化优化问题。本小节利用 K-means 聚类算法，基于不同的色差值范围聚类，得到不同色差值的簇类，从而确定新增的颜色种类及数量，实现现有瓷砖颜色均匀性（表现效果较好）及成本可观性。

6.3.1 问题三建模

假设新增颜色的种类数为 Q ，则新增第 q 种颜色而降低所有颜色点与现有瓷砖色差的总和可表示为 $\sum_{m=1}^{262144} \Delta E_m^{\min}(q)$ ，因此，色差降低速率定义为：

$$V = \frac{\sum_{m=1}^{262144} \Delta E_m^{\min}(q)}{\sum_{m=1}^{262144} \Delta E_m^{\min}(q-1)}, 1 \leq q \leq Q \quad (6.21)$$

其中， $\sum_{m=1}^{262144} \Delta E_m^{\min}(0)$ 表示未新增颜色时的色差总和。

令 C_0 表示研发一种新颜色瓷砖的成本，假设研发新颜色瓷砖的成本上限为 C^{\max} ，则新增颜色瓷砖的成本应满足：

$$C1: QC_0 \leq C^{\max} \quad (6.22)$$

此外，色差降低速率 V 应高于一定门限值 V^{\min} ：

$$C2: V \geq V^{\min} \quad (6.23)$$

因此，对于第 q 种新增的颜色，基于所有新增颜色点与现有瓷砖色差总和最小化的优化模型可以建模为：

$$\begin{aligned} \min \quad & \sum_{m=1}^{262144} \Delta E_m^{\min}(q) \\ \text{s.t. } C1: & QC_0 \leq C^{\max} \\ C2: & V \geq V^{\min} \end{aligned} \quad (6.24)$$

通过求解上述优化问题，即可求得新增颜色的数量及对应的 RGB 编码值。

6.3.2 问题三求解

类似于问题二的求解方法，本小节仍然采用基于 K-means 均值聚类算法求解式(6.24)所建模优化问题。具体地，当簇头数 $K=1$ 时，即增加 1 种颜色，基于 K-means 求出簇头位置，在满足成本限制条件下，即可确定新增颜色的 RGB 值；紧接着，令 $K=2$ ，即增加 2 种颜色，同样基于 K-means 求出 2 个簇头位置，基于式(6.22)和式(6.23)计算新增颜色所需成本及色差降低速率，此时若满足成本限制条件及色差降低速率限制条件，即可确定新增颜色的 RGB 值；以此类推，同样可以求出 $K=3$ ， $K=4$ 及其他 K 值下的新增颜色的 RGB 值，直到新增颜色瓷砖所需成本大于 C^{\max} 或者色差降低速率 V 低于门限值 V^{\min} 时，停止计算新增加的颜色。具体 K-means 的算法步骤与问题二的求解类似，在此不再进行详细阐述。

6.3.3 问题三结果分析

为了更直观的反应色差的变化，本文以色差均值代替色差总和来反应瓷砖颜色数量增加带来的效果，而不影响最后结果的判断。图 6.13 给出了色差均值与瓷砖颜色增加数量的关系图。从图中可以看出，随着瓷砖颜色数的增加，色差均值逐渐降低。这主要是因为瓷砖颜色数的增加，使得更多的采样点能有更相似的瓷砖颜色进行匹配，从而减小其与瓷砖颜色的色差，使得总的色差均值也逐渐减小。

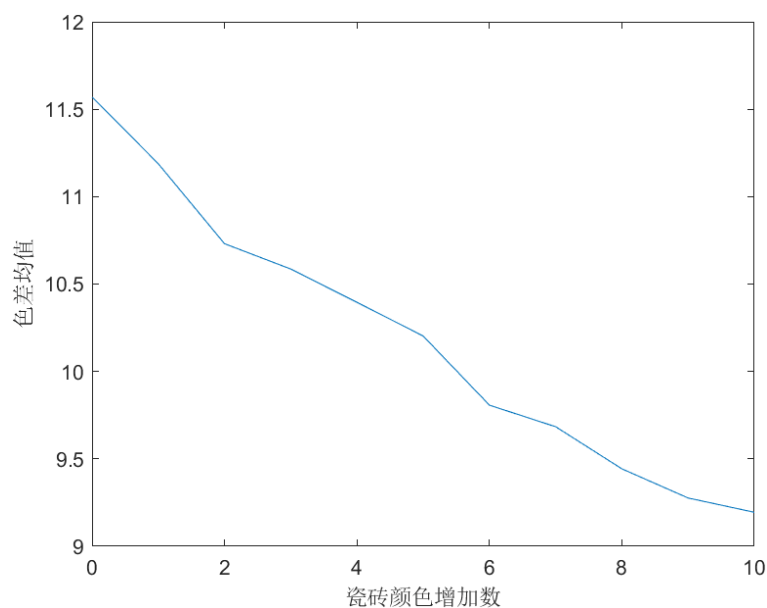


图 6.13 色差均值与瓷砖颜色增加数量关系图

图 6.14 给出了色差均值变化率与瓷砖颜色增加数量关系图。从图中可以看出，当瓷砖颜色数量增加到 6 种以后，其色差均值变化率逐渐降低。在瓷砖颜色数量为 10 种时，色差均值变化率低于 0.1。

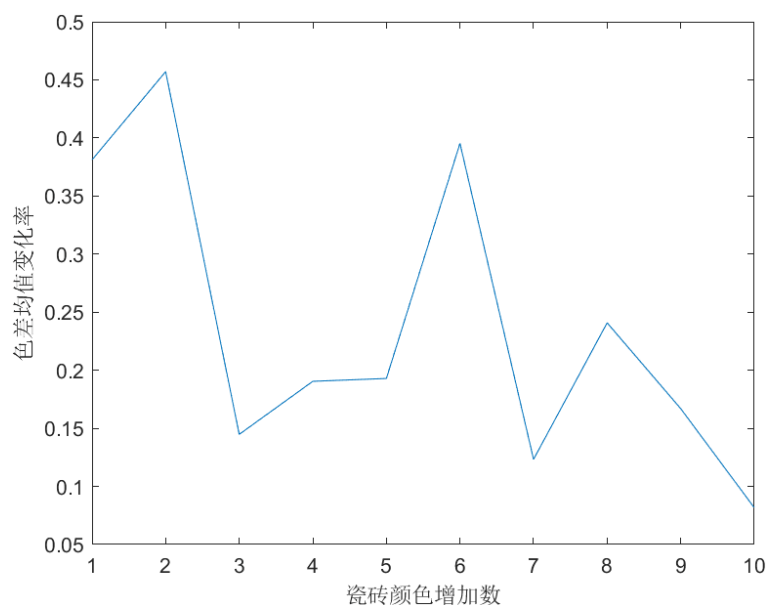


图 6.14 色差均值变化率与瓷砖颜色增加数量关系图

基于上述分析可知，在新增 6 种瓷砖颜色之后，再增加颜色种类带来的变化率有所下降。因此，本文综合考虑成本和表现效果，建议新增 6 种颜色的瓷砖，基于问题二可知，其 RGB 值分别为(44,38,173)，(140,50,164)，(35,47,44)，(77,149,128)，(107,41,41)，(137,110,74)。

此外，为了验证增色后对拼接图像表现力提升的效果，本文在图 6.1-图 6.3 的基础

上，给出了增色后各基准算法与本文所使用算法的近似结果，如图 6.15，图 6.16 所示。从图 6.15，图 6.16 可以看出，增加瓷砖颜色后，图像的表现力进一步得到了提升。

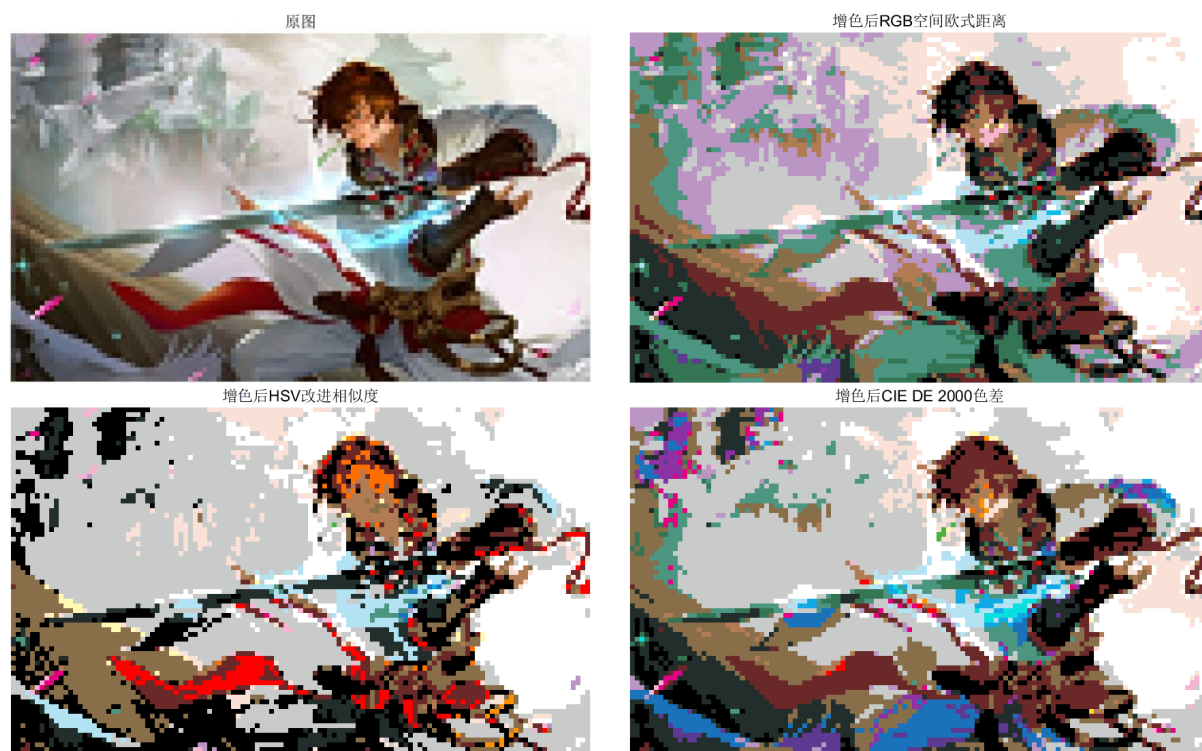


图 6.15 瓷砖颜色种类增加后的图像近似效果（卡通人物图）



图 6.16 瓷砖颜色种类增加后的图像近似效果（电影人物图）

七、模型评价

7.1 模型的优点

本文的主要内容是阐述了马赛克瓷砖的研究背景，颜色空间的选择及相似度的表示方法，找出了与附件图像的每种颜色最接近的瓷砖颜色，以及在只考虑拼接图像的表现力和综合考虑成本和表现效果情况下，实现了新瓷砖颜色的增加。通过数据预处理将瓷砖颜色可视化，综合考虑多种因素，设计了最为合适的马赛克瓷砖色差匹配算法、选色算法，在不同考虑情况下，增添合适的瓷砖色彩，大大增强了图像的表现力。实验结果证实，本文算法在帮助厂家选择瓷砖相近色进行图像色彩匹配与选色添色上的有效性与合理性。本文充分考虑了模型的现实条件，对模型的多种可能情况进行了分析。主要优点如下：

- 1) 模型的实用性较强，模型易于理解，符合实际；
- 2) 本文对比了基于 CIE2000 色差公式的瓷砖颜色匹配和基于加权欧式距离的瓷砖颜色近似算法；
- 3) 本文利用 CIE2000 色差计算新增颜色，符合人眼视觉感知，同时采用 K-means 均值聚类算法，有效解决了同时增加多种颜色的选择问题。
- 4) 本文利用所提算法客观对瓷砖颜色进行匹配及新增，避免了人眼视觉受外界因素的干扰，对色彩的错误判断以及降低在选色上的时间消耗。

7.2 模型的不足

虽然本文所建立的模型有效解决了马赛克瓷砖选色问题，但仍存在一些不足。主要包括：

- 1) 问题 2 所求得解是近似解，通过设定阈值，利用 K-means 聚类得到近似解，而所得结果与阈值的选择息息相关，而阈值的确定比较主观；
- 2) 模型验证的图片样本数较少，对算法效果验证可能有所不足。

参考文献

- [1] 张曼. 针对瓷砖的图像分类研究[D]. 广州: 广东工业大学, 2019.
- [2] 张岩. 瓷砖色差的计算机视觉检测技术研究[D]. 天津: 天津大学, 2010.
- [3] Li Xiao, Min Fang, Zhang Ju Jie, et al. Domain adaptation from RGB-D to RGB

- images[J]. Signal Processing, 2017, 131: 27-35.
- [4] 沈跃, 徐慧, 刘慧, 等. 基于 K-means 和近邻回归算法的 Kinect 植株深度图像修复[J]. 农业工程学报, 2016, 32(19): 188-194.
- [5] Cantrell K, Erenas M M, Orbepayá I D, et al. Use of the hue parameter of the hue, saturation, value color space as a quantitative analytical parameter for bitonal optical sensors[J]. Analytical Chemistry, 2010, 82(2): 531-42.
- [6] 汤泽军. 应用于色差计的两种典型色差公式的对比[J]. 长沙航空职业技术学院学报, 2015, 15(02): 52-55.

附录

一、问题一中与图像 1 最接近的瓷砖颜色结果

序号	瓷砖颜色编号	序号	瓷砖颜色编号	序号	瓷砖颜色编号	序号	瓷砖颜色编号	序号	瓷砖颜色编号
1	1	45	11	89	6	133	5	177	15
2	11	46	11	90	6	134	5	178	15
3	11	47	11	91	5	135	5	179	12
4	11	48	11	92	5	136	12	180	20
5	11	49	7	93	7	137	20	181	3
6	11	50	7	94	16	138	16	182	13
7	7	51	6	95	16	139	15	183	13
8	11	52	6	96	16	140	15	184	13
9	11	53	6	97	5	141	15	185	13
10	11	54	6	98	5	142	15	186	13
11	11	55	5	99	5	143	12	187	3
12	11	56	5	100	12	144	20	188	13
13	7	57	7	101	12	145	3	189	13
14	7	58	16	102	16	146	13	190	13
15	6	59	16	103	15	147	13	191	13
16	6	60	16	104	15	148	11	192	22
17	6	61	5	105	15	149	11	193	17
18	6	62	5	106	15	150	11	194	3
19	5	63	5	107	12	151	3	195	13
20	5	64	12	108	12	152	13	196	13
21	7	65	12	109	13	153	13	197	22
22	16	66	16	110	11	154	13	198	22
23	16	67	15	111	11	155	11	199	9
24	16	68	15	112	11	156	11	200	9
25	5	69	15	113	11	157	10	201	10
26	5	70	12	114	11	158	10	202	8
27	5	71	12	115	10	159	13	203	22
28	12	72	12	116	13	160	22	204	22
29	12	73	1	117	11	161	22	205	14
30	16	74	11	118	11	162	22	206	14
31	15	75	11	119	11	163	10	207	19
32	15	76	11	120	11	164	10	208	21
33	15	77	11	121	10	165	10	209	8
34	12	78	11	122	10	166	22	210	22
35	12	79	1	123	22	167	22	211	4
36	12	80	11	124	11	168	22	212	4
37	1	81	11	125	11	169	4	213	19

38	11	82	11	126	6	170	15	214	19
39	11	83	11	127	5	171	5	215	2
40	11	84	11	128	5	172	18	216	20
41	11	85	7	129	7	173	18		
42	11	86	7	130	16	174	20		
43	7	87	6	131	6	175	15		
44	11	88	6	132	6	176	15		

二、问题一中与图像 2 最接近的瓷砖颜色结果

序号	瓷砖颜色编号	序号	瓷砖颜色编号	序号	瓷砖颜色编号	序号	瓷砖颜色编号	序号	瓷砖颜色编号
1	12	41	7	81	11	121	15	161	8
2	15	42	15	82	11	122	15	162	3
3	6	43	5	83	12	123	13	163	13
4	6	44	11	84	5	124	22	164	22
5	5	45	11	85	15	125	12	165	13
6	12	46	11	86	7	126	15	166	9
7	11	47	7	87	11	127	18	167	13
8	7	48	11	88	11	128	22	168	9
9	6	49	11	89	16	129	14	169	19
10	16	50	6	90	12	130	10	170	22
11	6	51	16	91	5	131	14	171	13
12	7	52	16	92	11	132	22	172	17
13	16	53	16	93	11	133	11	173	22
14	15	54	11	94	10	134	13	174	4
15	6	55	11	95	11	135	10	175	8
16	5	56	7	96	5	136	10	176	19
17	12	57	11	97	11	137	13	177	19
18	5	58	16	98	15	138	22	178	19
19	5	59	11	99	6	139	3	179	13
20	5	60	11	100	5	140	13	180	8
21	11	61	6	101	11	141	10	181	19
22	7	62	15	102	6	142	18	182	13
23	5	63	6	103	5	143	15	183	17
24	7	64	12	104	5	144	10	184	19
25	16	65	6	105	11	145	20	185	8
26	5	66	5	106	11	146	13	186	9
27	11	67	12	107	10	147	13	187	8
28	6	68	7	108	10	148	22	188	13
29	6	69	5	109	5	149	18	189	14
30	5	70	12	110	15	150	19	190	4
31	12	71	1	111	15	151	10	191	22
32	5	72	11	112	20	152	4	192	9
33	11	73	5	113	5	153	13	193	17

34	7	74	11	114	12	154	3	194	17
35	6	75	6	115	5	155	3	195	4
36	5	76	11	116	11	156	15	196	8
37	12	77	7	117	10	157	13	197	8
38	5	78	16	118	16	158	19	198	13
39	11	79	11	119	11	159	10	199	13
40	7	80	11	120	12	160	13	200	9

三、问题二中同时增加不同种瓷砖颜色所对应的 RGB 值

同时增加 1 种 瓷砖颜色所对 应的 RGB 值	同时增加 2 种 瓷砖颜色所对 应的 RGB 值	同时增加 3 种 瓷砖颜色所对 应的 RGB 值	同时增加 4 种 瓷砖颜色所对 应的 RGB 值	同时增加 5 种 瓷砖颜色所对 应的 RGB 值
80, 32, 23	77, 38, 29	83, 65, 38	104, 59, 38	95, 38, 32
	137, 44, 188	77, 23, 23	83, 143, 122	137, 50, 176
		137, 44, 188	140, 47, 176	74, 152, 131
			47, 32, 32	119, 98, 68
				32, 38, 38
同时增加 6 种 瓷砖颜色所对 应的 RGB 值	同时增加 7 种 瓷砖颜色所对 应的 RGB 值	同时增加 8 种 瓷砖颜色所对 应的 RGB 值	同时增加 9 种 瓷砖颜色所对 应的 RGB 值	同时增加 10 种 瓷砖颜色所对 应的 RGB 值
44, 38, 173	134, 110, 68	41, 146, 116	128, 161, 137	125, 35, 47
140, 50, 164	38, 47, 44	134, 113, 59	146, 44, 161	167, 98, 101
35, 47, 44	116, 146, 140	95, 89, 152	35, 32, 155	38, 35, 149
77, 149, 128	44, 41, 164	41, 50, 44	122, 119, 38	38, 152, 113
107, 41, 41	38, 146, 113	152, 47, 158	164, 101, 98	92, 101, 167
137, 110, 74	116, 38, 44	35, 32, 158	41, 50, 44	143, 41, 158
	143, 50, 161	134, 155, 131	122, 35, 50	38, 50, 41
		119, 35, 47	92, 92, 149	83, 89, 92
			38, 149, 116	134, 161, 134
				131, 128, 35