基于几何相似特征的石窟造像装饰图案生成方法

裴卉宁, 邵星辰, 郭任哲, 张新新*

(河北工业大学建筑与艺术设计学院 天津 300401)
(zhangxinxin@hebut.edu.cn)

摘 要: 针对石窟造像装饰图案设计中图案基元的组合方式不够灵活多变、画面布置与调整耗时、图案基元间的交叉重叠问题, 提出一种基于几何相似特征的图案生成方法. 首先明确图案属性, 利用Freeman链码描述图案基元轮廓信息; 然后利用最长公共子序列计算图案基元间的几何相似性特征; 接着基于计算结果对图案基元进行设计布局, 完成子图案的效果生成; 最后依据检测和识别出的图案空间分布模式将子图案进行扩充生成. 采用响堂山石窟中的装饰图案基元数据进行实验的结果表明, 所提方法不仅解决了图案基元组合优化问题, 而且能实现复杂图案的快速生成设计, 该方法在图案基元的匹配时间为 19.2 s, 比人工方法的 36.1 s 更优.

关键词: 图案基元; Freeman; 最长公共子序列; 几何相似特征; 子图案
中图法分类号: TP391.41 **DOI:** 10.3724/SP.J.1089.2023.19702

A Method for Generating Decorative Patterns of Grotto Statues Based on Geometric Similarity Features

Pei Huining, Shao Xingchen, Guo Renzhe, and Zhang Xinxin*

(*School of Architecture and Art Design, Hebei University of Technology, Tianjin* 300401)

Abstract: In order to solve the problems that the combination mode of pattern elements in the decorative pattern design of grottoes was not flexible enough, the layout and adjustment of pictures in the design will be time-consuming and the overlapping of pattern primitives, a pattern generation method based on geometric similarity features is proposed. Firstly, it defined the pattern attributes and basic concepts. Secondly, Freeman chain code was used to describe the contour information of pattern primitives, and the longest common subsequence (LCS) was used to calculate the geometric similarity between pattern primitives. Based on the calculation results, the layout of pattern primitives was designed to complete the generation of subpatterns. Finally, the subpatterns were expanded according to the spatial distribution patterns detected and recognized. Experiments were carried out with decorative pattern primitives in Xiangtang Grottoes. The experimental results showed that the proposed method not only solves the problem of pattern primitive combination optimization, but also realizes the rapid generation and design of complex patterns. In addition, the matching time of the proposed method is 19.2 s, which is superior to 36.1 s of the artificial method.

Key words: pattern primitive; Freeman; longest common subsequence; geometric similarity features; subpattern

收稿日期: 2022-05-06; 修回日期: 2023-02-17. **基金项目**: 河北省社会科学研究项目(HB23YS002). **裴卉宁**(1986—), 女, 博士, 硕士生导师, 主要研究方向为人因可靠性、计算机辅助工业设计等; **邵星辰**(1997—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为文化创意设计、计算机辅助工业设计等; **郭任哲**(1997—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为汽车设计、计算机辅助工业设计等; **张新新**(1991—), 女, 博士, 硕士生导师, 论文通信作者, 主要研究方向为工业设计理论与方法、感性工学.

目前, CAD 系统是针对图案创新设计的一种主要的交互编辑工具, 其本身没有创作能力, 设计师需要具有深厚的美术功底和图案设计经验方可设计出高质量的图案方案[1-2]. 面对工艺品种类繁多的设计需求, 减轻设计师绘制的工作量, 提高图案基元的重用, 对于图案设计研究具有重要意义.

组成图案的基本形态均由点、线、面 3 种基本视觉元素构成, 并以规则或不规则的方式排列与组合, 形成新的形态[3], 已有文献主要研究提取与重用特定图案设计的规则. 张欣蔚等[1]基于本体和形状文法, 利用基元轮廓之间的相似性构建图案规则与重用图案基元; Kaplan[4]依据图案分布规则提取民族特色星形图案, 对图案元素进行重新组合再设计; 胡文文[5]基于自然图像与剪纸的相似性, 利用轮廓点分布直方图和形状上下文(shape context, SC)描述二者的元素、匹配计算与自动布局设计, 完成规则重用; 金诗怡等[6]基于分层的方式分解提花-印花织物, 并以散点排列和连续排列的方式实现图案基元的组合, 完成整幅织物的设计.

上述研究针对某类特定规则下的图案规则提取与重用, 且多基于单个图案基元设计生成, 缺乏对于多图案基元间重组方式的研究, 使得图案基元的重用率不高, 难以满足设计多样化的需求. 基于此, 部分学者研究图案设计中任意图形之间组合生成的自定义图案. 李华飙等[7]通过距离变换函数自适应填充多个基元, 实现图案的创新性生成; Zhang 等[8]基于变体操作, 利用单线段、平行多段线和一组交叉线组成各种块状元素, 实现装饰艺术图案块状化生成; Chen 等[9]基于边界曲线选取图元及自由生成, 引入用户交互对图元位置关系进行细粒度编辑, 降低图案基元组合设计的复杂度; Reinert 等[10]利用弹簧质点系统约束包装设计中多图案间的关系, 生成包装图案. 但是, 通过多图案基元融合来生成图案时, 对于基元间组合优化问题的研究较少, 存在多个图案基元的组合方式不够灵活多变、设计中的画面布置与调整耗时较多, 以及图案基元间易发生交叉重叠等问题.

响堂山石窟造像装饰图案中包含大量独立的几何或植物纹样基元组合, 并依据一定的分布模式生成图案. 结合上述问题和石窟造像装饰图案设计过程中的多图案基元组合优化特征, 本文提出基于几何相似特征的石窟造像装饰图案设计方法. 首先通过 Freeman 链码描述图案轮廓特征; 然后利用最长公共子序列(longest common subsequence, LCS)对所得图案基元间的轮廓相似信息可视化; 再依据图案基元间的轮廓特征进行自适应组合的布局设计; 最后检测出响堂山石窟纹样的空间分布模式, 建立图案的空间分布模式层, 进行响堂山石窟造像装饰图案的再设计, 为图案生成的多样性提供参考.

1 相关工作

1.1 图案基元与子图案的定义

图案基元指在某一民族的生产生活中出现的、呈现其文化特色的、单一的、典型的、具有独立语义和稳定形态的、大小形状不同的几何学图案单元, 以一定的空间结构形成具有特殊寓意的图案[11]. 几何纹、植物纹和动物纹等图案均由相应的基元构成, 通过对其进行组合、旋转或平移等变换, 生成相应的子图案, 或赋予子图案一定的变化, 进而生成具有某种结构的图案. 图案基元的基本定义如下:

(1) 图案 c 为一系列子图案组成的序列, 即 $c=[c_1,c_2,c_3,\cdots,c_n]$.

(2) 子图案 o 为有限个基元组成的复合轮廓, 即 $o=[o_1,o_2,o_3,\cdots,o_m]$.

(3) 基元 q 为有限个点组成的封闭曲线, 即 $q=[q_1,q_2,q_3,\cdots,q_r]$.

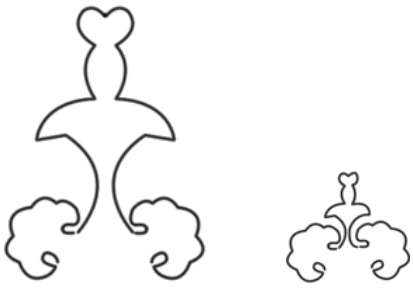
图案均具有基本构成单元, 如二方连续图案由一个子图案通过上下或左右 2 个方向的排列方式构成. 图案设计中, 构造模式不变的情况下, 子图案的设计直接影响图案生成的多样性, 故分析图案基本单元特征是研究图案设计属性的关键. 图 1a 和图 1b 所示为 2 个图案基元; 通过不同的组合方式, 可以将图案基元组合成不同的图案, 如图 1c~图 1f 所示. 例如, 可以将“花蕊”作为主要基元进行放大与“云朵”进行组合, 或将云朵缩小比例与花蕊进行组合, 其组合方式不仅受基元比例的影响, 组合位置变化亦是图案设计视觉效果的关键影响因素.

1.2 图案基元信息描述

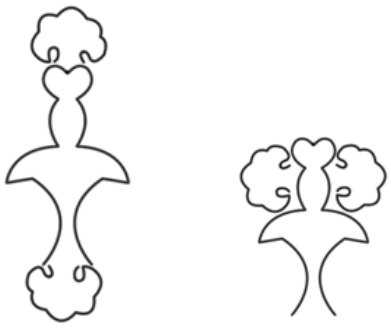
图案基元轮廓信息描述方面, 陶晨等[12]基于 Hu 矩计算所选图案基元的 7 个特征值, 用于衡量图案基元与模型的相似性; 贾小军等[13]基于卷积神经网络模型对所提取的蓝印花布纹样基元进行训练, 完成不同基元轮廓信息描述并进行归类; 陈佳舟等[14]结合局部和全局 SC 描述剪纸图案基元形状, 完成图案基元间相似性的检测. 上述研究虽然丰富了图案基元轮廓信息的表达, 但主要是对图



a. 图案基元 1——云朵　b. 图案基元 2——花蕊



c. 图案 1　　d. 图案 2



e. 图案 3　　f. 图案 4

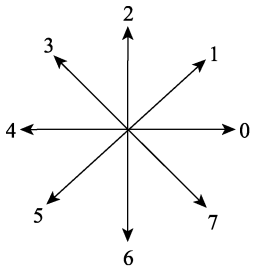
图 1　图案基元及其组成的图案

案基元相似性的定量描述, 缺乏对其轮廓特征的定性表达, 且从图案基元布局的角度对轮廓进行形状描述的工作较少. 因此, 本文利用 Freeman 链码描述图案基元的轮廓信息, 并对图案基元间的轮廓信息进行可视化表达.

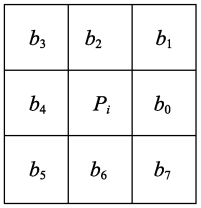
如图 2 所示, 任意一个像素周围均有 8 个邻接点, 而 8 方向链码与像素点的方位相符, 能够准确地描述中心像素点与其邻接点的信息, 且 8 个通道 Freeman 链码可有效地描述轮廓的几何信息[15]. 因此, 本文采用 8 方向 Freeman 链码对提取的图案基元轮廓进行编码.

1.3　图案生成

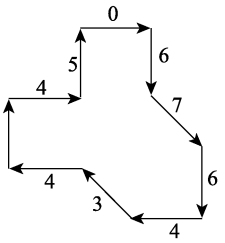
由图 1 可知, 石窟造像图案的构成可描述为由多个图案基元组合设计生成子图案, 以及子图案的规则重用生成图案 2 个过程. 已有一些对图案生



a. 8个通道对应的链码值



b. 一个像素相邻的8个方向图



c. Freeman 链码跟踪轮廓形状过程

图 2　Freeman 链码的形状信息描述

成的深入研究. 张欣蔚等[1]基于提取出的图案的空间分布模式参数, 将单一形状基元作为子图案进行填充, 生成子图案; 李岳等[16]针对图案设计中子图案的生成, 应用扩大对称技术与基于路径的装饰技术对单个图案基元进行变化生成. 上述模型主要是针对单一图案基元下空间分布模式的重用, 涉及不同图案基元间的自由组合设计较少. 由于石窟造像装饰图案中的子图案往往是由 2 种及以上图案基元组合而成的, 且分布空间和谐紧密, 现有模型无法高效地进行多种图案基元的生成, 因此, 本文依据图案基元自身的轮廓特征, 利用不同图案基元生成装饰图案.

利用 LCS[17]搜索 2 个图案基元之间的相似性特征.能够通过搜索轮廓的 2 个几何信息序列之间的最长公共子序列, 获得两者间的几何相似性特征. 为使图案基元之间的匹配更加灵活, 可跳过任一子序列与另一子序列中的任何不匹配的字符, 使图案基元之间的组合更多样化, 克服现有相似性计算方法只能处理轮廓非常一致的矢量图形的局限性. 因此, LCS 能够对图案基元间的相似性进行准确计算, 也能够对图案基元间的组合关系进行生成, 弥补现有研究缺少通过图案基元间组合设计生成子图案的不足. 由于计算所得的 2 个子序列不同, 因此利用动态规划进行惩罚来解决 LCS 存在的问题. 利用动态规划算法改进后的函数为

$$C(i,j)=\begin{cases}0, & i=0\|j=0\\ C(i-1,j-1+1), & |a_i-b_j|\leqslant K_p, i\in Z[1,n], j\in Z[1,m]\\ \max\left(C(i,j-1),C(i-1,j)\right), & |a_i-b_j|>K_p, i\in Z[1,n], j\in Z[1,m]\end{cases} \tag{1}$$

其中，$C(i,j)$表示 LCS 长度，K_p表示描述 2 个序列相似性判断精度的相似阈值，a_i和b_j分别表示长度为n和m的 2 个序列的元素. 针对图案基元间组合布局的整体度，首先依据计算得出的几何相似特征重心与方向实现图案基元间的初步匹配，然后利用迭代最近点(iterative closest point, ICP)算法实现图案基元间的布局进行优化.

石窟造像装饰图案空间分布模式通常分为圆弧型和直线型 2 种，圆弧型指多个图案基元组合设计而成的子图案呈圆弧状分布；直线型指子图案以上下或左右 2 个方向沿直线排列而成. 由于石窟造像装饰图案中的子图案由不同图案基元组合而成，因此，本文依据子图案的最小包围矩形提取空间分布参数中拟合圆的中心t_c、半径r和采样数量n等.

2 石窟造像装饰图案生成模型

受中国传统文化中关于阴阳平衡的影响，我国石窟造像装饰图案在基本元素布局上体现出“构图饱满”“凹凸互补”的特点，通过对立统一达到和谐的效果[12]，图案基元之间的相对变换方法是其组合、优化、生成图案的关键. 部分图案基元轮廓虽并不相似，但空间的相似性导致其在视觉、隐喻上共同构成一个图案. 本文以响堂山石窟造像装饰图案为例，依据其特征进行图案基元的重组和布局. 如图 3 所示，基于几何相似特征的石窟造像装饰图案生成模型分为 4 部分.

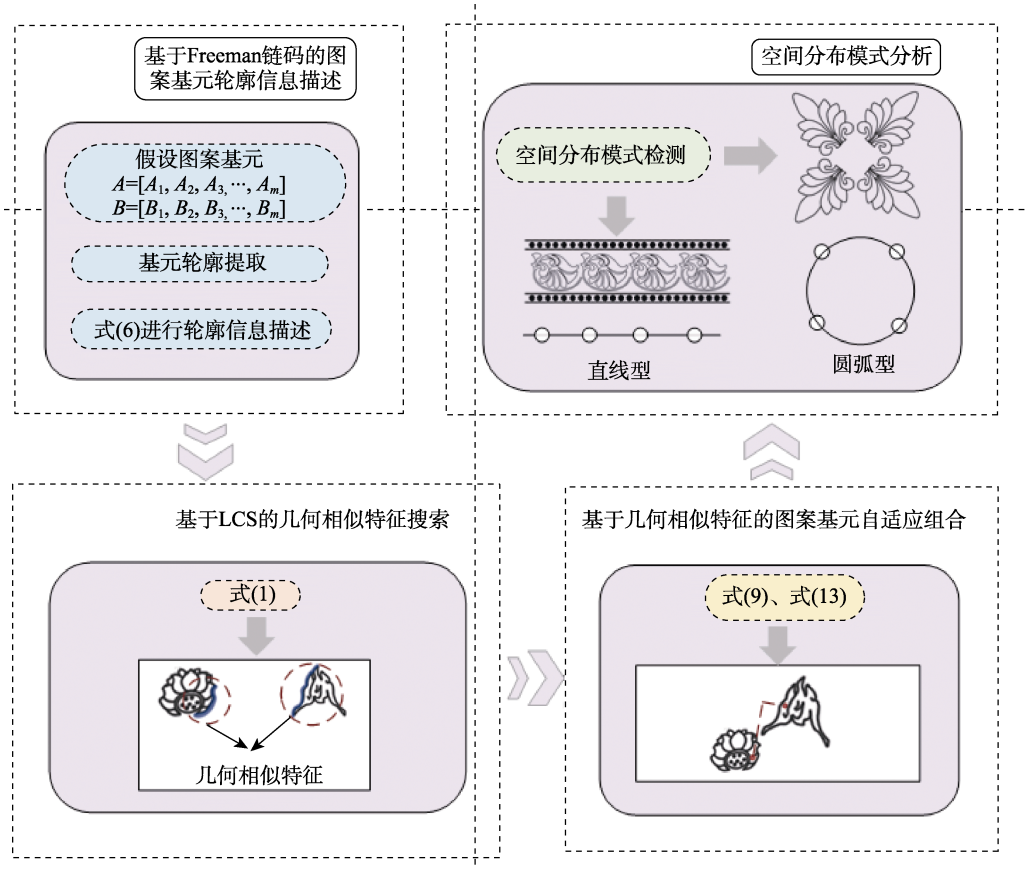


图 3 本文模型框架

2.1 基于 Freeman 链码的图案基元轮廓信息描述

依据图案学中的适应法，不同图案之间具有相互组合与相互适应的特点[18]，且能够确保图案基元之间组合的和谐性，因此图案基元之间的重组需按照其轮廓的形状特征进行设计.

(1) 利用色彩分割算法与形态学原则提取图案基元的轮廓特征. 由于所选用的图案基元为灰色且颜色对比度较小，因此使用图案基元中像素点的色调、饱和度和亮度进行色彩空间表示[19]. 其中, RGB 空间到 HSV 空间的转换公式为

$$V=\max\left(R,G,B\right) \tag{2}$$

$$S=\begin{cases}\dfrac{V-\min(R,G,B)}{V}, & V\neq 0\\ 0, & \text{other}\end{cases} \tag{3}$$

$$H=\begin{cases}\dfrac{60(G-B)}{V-\min(R,G,B)}, & V=R\\ 120+\dfrac{60(G-B)}{V-\min(R,G,B)}, & V=G,\\ 240+\dfrac{60(G-B)}{V-\min(R,G,B)}, & V=B\end{cases}$$

$$H<0,\ H=H+360 \tag{4}$$

(2) 对图案基元二维描述符进行描述. 由于需要获取图案基元间的位置信息, 而现有的多数轮廓特征描述方法通常用于计算轮廓特征间的相似性信息, 且与 LCS 相结合的可操作性较难, 如经典的边界方向直方图和 Hough 变换检测平行直线方法. 与曲率描述法相比, Freeman 描述图案基元轮廓特征信息时计算量小, 对噪声不敏感, 且可以满足实时性的要求. 因此, 选用被广泛用于代表一个物体外形的 Freeman 链码(一条以数字代表方向向量的链码曲线)来识别物体的外形特性, 其可以再现物体外形信息和缩减冗余数据. 数字化曲线的链码表示曲线上相邻点之间的方向变化序列, 任何几何轮廓形状均可用链码序列表示, 参与图案基元组合的二维自由轮廓可以由一系列链码表示, 而不会失去准确性. 其中, 原始 Freeman 链码不具有轮廓描述的几何旋转不变性, 其数学表达式为

$$M=S\overset{n}{\underset{i=1}{C}}\alpha_i=S\alpha_1\alpha_2\alpha_3\cdots\alpha_n,\alpha_i\in Z[0,7] \tag{5}$$

其中, S 表示轮廓像素的绝对向量坐标点; $\overset{n}{\underset{i=1}{C}}\alpha_i$ 表示相邻像素之间的方向链码. 但是, 像素的坐标用于计算链码源于绝对坐标系, 像素之间的方向链码是独立的, 使得轮廓形状像素之间没有连接. 当考虑链码的差分和归一化时, 几何信息的描述将具有几何不变性[20]. 因此, 须对链码进行差分和归一化处理, 使其具有几何旋转不变性, 保证轮廓特征的链码的唯一性, 且特征的起点选取构成的自然数最小的那组链码对应的起点. 图 4 所示为图案基元的 Freeman 可视化过程, 其差分处理函数为

$$\begin{cases}\alpha_1'=(\alpha_1-\alpha_n)\bmod N, & i=2,3,\cdots,n\\ \alpha_i'=(\alpha_i-\alpha_{i-1})\bmod N, & i=2,3,\cdots,n\\ M'=S'\overset{n}{\underset{i=1}{C}}\alpha_i', & i=2,3,\cdots,n\end{cases} \tag{6}$$

其中, N 表示链码方向数; S' 和 S 均表示起点, 但对于原始形状和旋转后的形状而言, 取 Freeman 链码差分后的新链码并用 M' 表示.

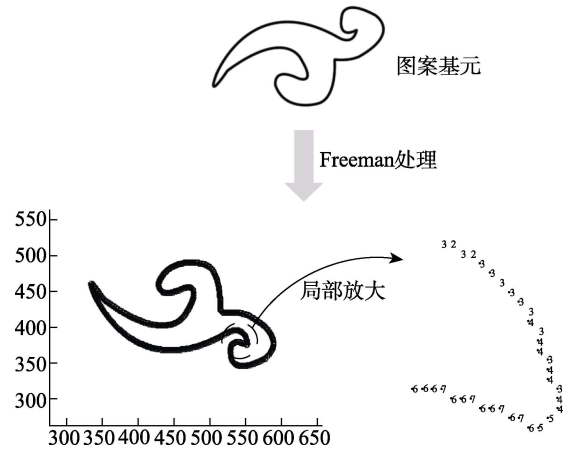


图 4　图案基元的 Freeman 处理

2.2　基于 LCS 的几何相似特征搜索

图案基元在不同比例下生成的图案具有差异性, 为提升生成图案的多样性, 基于图案基元的轮廓信息对选定图案基元进行仿射变换操作, 将图案基元按照一定倍数进行放大或缩小. 其表达式为

$$\begin{cases}X=f\times x\\ Y=g\times y\end{cases} \tag{7}$$

其中, f 表示点在 x 轴上的缩放倍数; g 表示点在 y 轴上的缩放倍数; $[X\ Y]$ 表示 $[x\ y]$ 缩放后坐标, 用矩阵可表示为

$$[\boldsymbol{X}\ \boldsymbol{Y}\ \boldsymbol{1}]^{\mathrm{T}}=\begin{bmatrix}f & 0 & 0\\ 0 & g & 0\\ 0 & 0 & 1\end{bmatrix}[\boldsymbol{x}\ \boldsymbol{y}\ \boldsymbol{1}]^{\mathrm{T}} \tag{8}$$

获得图案基元的轮廓信息序列后, 对图案基元之间的几何相似特征进行搜索. 为保证 LCS 计算的准确性, 对 LCS 算法进行优化, 将特征 Freeman 链码展开 2 圈后存放在一个二维数组中, 如 $X=\langle B,C,D\rangle$ 是 $Z=\langle A,B,C,E,D\rangle$ 的子序列, 计算时将其转化为 $Z=\langle A,B,C,E,D,A,B,C,E,D\rangle$ 与 $X=\langle B,C,D\rangle$, $Z=\langle A,B,C,E,D\rangle$ 与 $Z=\langle B,C,D,B,C,D\rangle$ 的 LCS 的计算, 避免出现 LCS 计算时起点在相似序列中间的问题.

用 LCS 搜索 2 个图案基元之间的相似性特征时, 若基于特征的起始位置和结束位置逐个搜索, 计算量会大幅度增加. 因此, 利用改进后的动态规划算法求解, 应用其中的标准回溯, 经过以下步骤求解 2 个序列的 LCS.

(1) 若同时满足条件 $C(i,j)=C(i-1,j-1+1)$

和 $a_i=b_j$ 或 $C(i,j)=C(i-1,j-1+1)$ 和 $|a_i=b_j|\leqslant K_p$，则将记录和的值，更新和的下标值；

(2) 若不同时满足条件，则不记录任何内容，然后分别判断等式 $C(i,j)=C(i,j-1)$ 和 $C(i,j)=C(i-1,j)$. 若前者为真，则新下标值将更新为 $i=i$, $j=j-1$；否则，新下标值为 $i=i-1, j=j$.

2.3 基于几何相似特征的图案基元自适应组合

首先利用动态规划算法搜索 2 个图案基元的几何相似特征，包括序列位置和起点、终点的坐标信息，得到 2 个序列的 LCS，对应线段分别用 E 和 F 表示；然后给定 2 条高线 C_e 和 C_f，使得 $E\subset C_e$ 和 $F\subset C_f$，令 E 和 F 相对应与联系，针对每对对应的片段 E 和 F，基于其方向和重心进行计算转换，如图 5 所示. 几何重心记为 $(\overline{x},\overline{y})$，可由特定标准矩计算，公式为

$$\begin{cases}\overline{x}=\dfrac{m_{10}}{m_{00}}\\ \overline{y}=\dfrac{n_{10}}{n_{00}}\end{cases} \tag{9}$$

其中，$\overline{x}$，$\overline{y}$ 为所得几何相似特征线段重心的坐标.

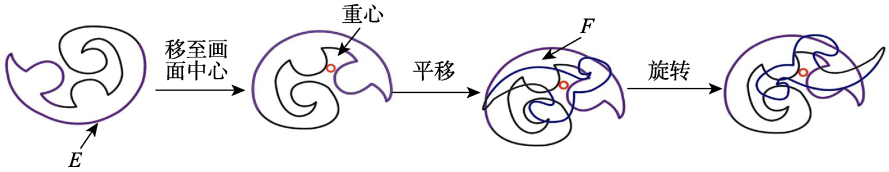


图 5 基元变换过程

此外，利用 ICP 算法[21]将得到的图案基元之间的几何相似特征信息进行更为精准的组合布局. 对于一个片段 E 边界上的每个点，在另一个片段 F 上找到距离其最近的点作为对应点；基于 E 上的点对应地求解刚性变换并不断迭代，以更好地与 F 对齐. 步骤如下:

Step1. 在 E 目标点云中为 F 待配准点云寻找最近的点集 p_i^k. 公式为

$$p_i^k=\arg\ \min\|q_i-p_i\|_2 \tag{10}$$

其中，p_i 和 q_i 分别表示目标点云和待配准点云中的点.

Step2. 通过最小二乘法计算 Step1 中点对的转换参数. 公式为

$$(R,t)=\arg\ \min\|Rq+t-p\| \tag{11}$$

其中，$\boldsymbol{R}^{k+1}$ 表示旋转矩阵；$\boldsymbol{t}^{k+1}$ 表示平移矩阵. 然后，对 $\boldsymbol{q}^{k+1}$ 进行旋转变换. 公式为

$$\boldsymbol{q}^{k+1}=\left\{\boldsymbol{q}_i^{k+1}=\boldsymbol{R}^k\boldsymbol{q}_i^{\,k}+\boldsymbol{t}^k,\boldsymbol{q}_i^{\,k}\in\boldsymbol{q}\right\} \tag{12}$$

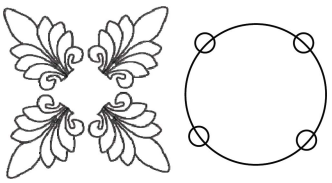
Step3. 计算转换后的距离 d^{k+1}. 公式为

$$d^{k+1}=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left\|\boldsymbol{q}_i^{k+1}-\boldsymbol{p}_i^k\right\|_2^2 \tag{13}$$

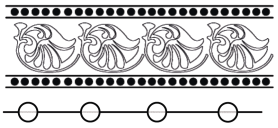
当平均距离小于给定的阈值或迭代次数大于给定的迭代次数时，迭代终止，精配准亦完成. 其中，在点与点的配对中，若满足以下 3 个条件之一，则一对点之间的对应关系被识别为异常值: (1) 2 个对应点之间的距离大于阈值; (2) 2 个对应点的法向量不是点积远离，即指向相反的方向; (3) 2 个对应点之间的色差较大.

2.4 空间分布模式分析

装饰图案是石窟造像的重要元素之一，通常由多个子图案元素组合而成，且子图案元素的空间分布具有特定的构造规律. 以响堂山石窟为例，装饰纹样中子图案的空间分布模式较为固定，以直线型和圆弧型分布最为常见，如图 6 所示. 图 6a 中，图案由同一元素组成；图 6b 中，图案由两侧装饰元素、忍冬纹与藤蔓组合 2 大类元素共同构成.



a. 圆弧型



b. 直线型

图 6 响堂山石窟造像装饰图案空间分布模式

为了准确地表达文化寓意、提高装饰性，本文提出一种针对石窟造像装饰图案的空间分布模式自动检测和分析方法. 首先基于 LCS 的计算方法实现相似子图案的计算，并进一步聚类；然后计算同一类中子图案的空间分布参数，高效、稳定地检测空间分布模式. 定义 2 个轮廓相似度计算函数为

$$P_{\mathrm{DS}}=\frac{\sum S_{\mathrm{DS}}}{F\left(\hat{T}_V,L\right)}\times 100\% \tag{14}$$

其中，$F\left(\hat{T}_V,L^*\right)$ 表示 LCS 计算值；S_{DS} 表示点对距

离匹配度.

石窟造像装饰图案中的子图案是多个图案基元组合而成的, 首先将轮廓中的组合图案基元依据 P_{DS}=0.95 为边界值进行分离, 形成各个相似轮廓类 $N_1,N_2,\cdots$, 剩余的图案基元轮廓归入不相似轮廓类 M. 然后对各个相似轮廓类 $N_1,N_2,\cdots$ 进行参数计算, 并对每个相似轮廓类子类进行圆弧拟合, 若从相同子图案中分离得到的相似轮廓类中图案基元数目相同, 且拟合方程相同, 则定义其所属子图案为相似轮廓类, 据此分析子图案的空间分布规律. 最后, 将同一子图案最小外接矩形中心点代入圆弧公式 $t_c(t)=(t-t_c)^2-r^2$, 通过最小二乘法拟合得到参数 $\phi=\{t_c,r,e,n_c,s\}$. 其中, e 表示拟合误差; n 表示采样数量, 即子图案元素的个数; s 表示子图案最小外接矩形的面积. 以其中任意子图案最小外接矩形中心点 (Z_x,Z_y) 为定点, d 为与 Z 相邻点的距离, 在半径为 $\lambda\cdot d$ 的范围内(λ 为距离偏差系数), 搜索其他 2 个子图案最小外接矩形中心点是否落在该区域内. 若落在该区域内, 则空间分布模式为直线型, 将上述 2 种类型作为空间分布模式类型的检测方程.

3　实　例

3.1　石窟造型装饰图案生成

从石窟造像装饰图案中选取若干图案基元, 利用轮廓信息将其重新组合、布局生成新的图案, 提高图案基元的重用率, 在一定程度上减少设计师进行图案设计时的主观性. 步骤如下:

Step1. 图案基元轮廓信息的描述. 首先用户从图元库中选择要填入的图案基元, 以响堂山石窟中的图案为例, 选取最具代表性的图案基元 A 莲花纹与图案基元 B 火焰纹作为设计元素(如图 7a 所示), 将子图案生成设计的画布设置为 2 000 像素×2 000 像素; 然后对选取的图案基元进行仿射变换操作, 将比例参数设置为 $x=0.2,0.4,0.6,\cdots,1.4$, 形成不同比例的数字化图案基元, 获取图案设计基元组合库空间, 并对图案基元的轮廓特征进行提取(如图 7b 所示), 调整图案基元间的组合变化; 最后, 对所有可能的图案基元序列 $A=[A_1,A_2,A_3,\cdots,A_7]$ 和 $B=[B_1,B_2,B_3,\cdots,B_7]$ 进行全排列组合(如图 7c 所示), 基于色彩分割及形态学操作对选取的图案基元轮廓进行提取(如图 7b 所示), 利用 Freeman 链码描述并记录轮廓信息, 最终将不同比例的图案基元的轮廓信息以表格的形式储存, 进行后续操作.

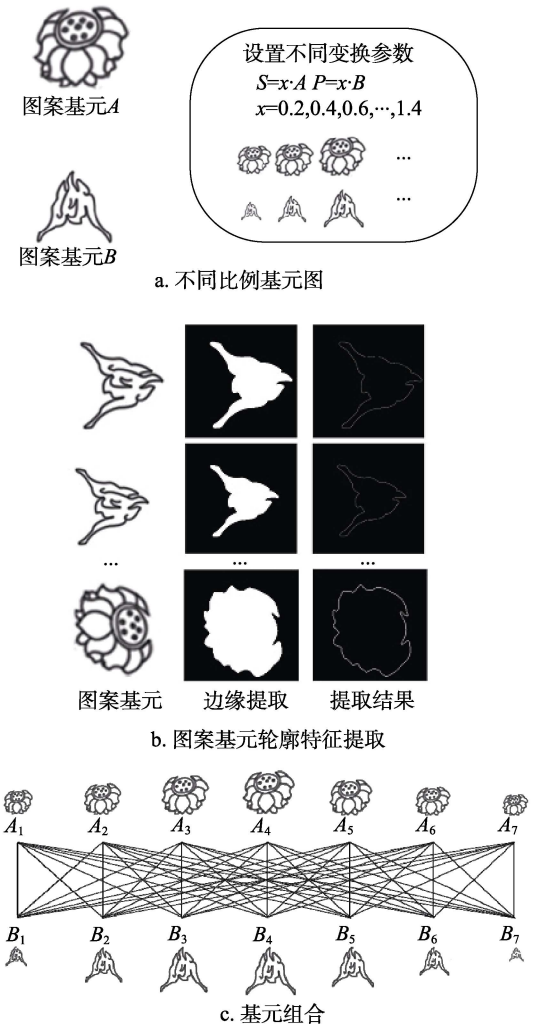


图 7　图案基元组合空间

Step2. 图案基元的几何相似特征搜索. 利用第 2.2 节的方法求解不同比例莲花纹与火焰纹交叉组合之间的轮廓信息 LCS, 得到所有合理的匹配基元轮廓信息后对特征进行颜色标记, 如图 8 所示.

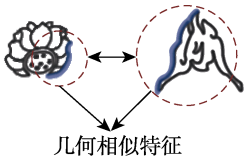


图 8　图案基元的几何相似特征

Step3. 图案基元的自适应组合设计. 依据计算得到的几何相似特征的重心和方向对所计算得到的图案基元轮廓信息进行基本变换, 根据用户需求采用 ICP 算法进行布局优化, 完成图案基元之间的融合设计, 布局设计过程如图 9 所示. 过程步骤: 步骤(1)将图案基元放置画面中心, 并计算得出几何相似特征线的重心; 步骤(2)计算得出图案基元 A 几何相似特征的重心距离; 步骤(3)按照重叠检测算法检查图案基元布局的重叠情况, 若发生重叠, 则对图案基元进行上下或左右方向的平移

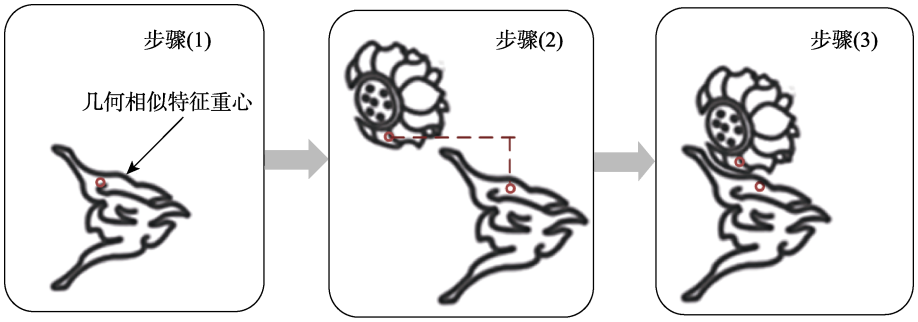


图 9 图案基元自适应组合过程

以消除重叠; 否则, 直接得到生成结果, 并利用 ICP 实现精准匹配.

生成所有的子图案需要大量计算时间, 并且存在过多选择, 为了减少和辅助用户选择, 更好地反映图案生成设计时输出方案的质量, 本文提出基于形态整体度优化筛选方法. 其中, 整体度是衡量元素布局的紧凑程度, 整体度越高, 则形态复杂性越低, 越容易识别, 形态越协调. 整体度 u 的计算公式为

$$u=1-\frac{a_g-\sum_{i=1}^{n}a_i}{a_o-\sum_{i=1}^{n}a_i} \tag{15}$$

其中, a_g 表示元素群最小外接矩形的面积; a_o 表示轮廓线形态的面积. 子图案最小外接矩形的高宽比 $\lambda=h/a$, 能够描述子图案的大致外形信息(规定 $a>h$). 如果子图案填入 λ 差别较大, 会出现较多空白或超出限制范围, 因此基于图案形态整体度进行不同方案的筛选, 将 u>0.6 的子图案进行再设计. 部分筛选结果展示如表 1 所示.

表 1 部分设计结果展示图

图例	基元 A	基元 B	图例	基元 A	基元 B
	1.2	1.2		1.0	0.6
	1.0	1.2		1.0	0.4
	0.4	1.0		0.2	1.0

Step4. 基于空间分布模式的子图案扩充生成. 图案基元自适应生成后, 形成的子图案既可以作为单独纹样, 也可以作为一个单位的形式特征生成具有一定模式的图案. 按照第 2.4 节的方法进行重用, 并通过改变参数半径 r 和采样数量 n 进行子图案扩充设计, 结果如图 10 所示.

3.2 石窟造型装饰图案基元匹配

自适应组合规则不仅可用于图案基元之间布局关系的生成, 也可衡量图案基元与图案基元之间的匹配, 生成具有风格约束的图案, 即检索、匹配并替换现有图案设计中的局部特征, 满足用户制造的定制化需求. 自适应组合规则的参数用于图案基元外轮廓检测、几何相似特征的计算, 其在大量图案基元库的选择上的优势更明显, 可快速得到与用户要求更匹配的图案基元. 实验采用 C++语言编写, 运行于 Intel(R) Core(TM) i5-6300HQ CPU@ 2.30 GHz, Windows10 操作系统. 图案基元匹配算法步骤如下:

Step1. 图案基元轮廓信息描述. 如图 11 所示, 给定一个图案样例, 选取替换的特征基元. 根据用户需求选取满足用户意向的响堂山石窟造像装饰图案基元, 衡量选取的各个意向图案基元与图案边界外轮廓的比例关系, 将重心重合进行重叠交叉检测. 在初始化阶段, 检测边界轮廓内部是否包含其他图案元素, 即是否存在空洞; 将图案基元放入转移位置后, 检测其是否超出边界轮廓边缘, 或与边界轮廓中其他图案元素发生重叠. 若超出或重叠, 则对整体连通性不利, 需采用循环缩小并检测边界轮廓位置, 直至图案基元完全落入边界外轮廓范围内, 且不发生重叠.

利用色彩分割等形态学方法检测图案基元和边界轮廓特征, 基于 Freeman 完成特征基元轮廓与选取特征基元轮廓链码信息的描述, 并以表格形式存储信息.

Step2. 几何相似特征搜索. 计算选取的图案基元与特征基元的几何相似特征, 将其分为相似性较大图案基元与相似性较小图案基元, 其伪代码链接: https://pan.baidu.com/s/1YxE9Phh73VcoK1ylbxBkNQ?pwd=4m18.

上述方法生成结果如表 2 所示. 为了验证该方法的可靠性, 选取 1 名具有设计背景的被试进行人工分类筛选, 结果如图 12 所示.

从图 12 和表 2 可以看出, 图案基元 4 和图案基元 6 中, 虽然人工筛选和图案基元匹配算法的相似性不同, 但它们的总一致率较高; 在计算时间上, 人工筛选用时 36.1 s, 采用图案基元匹配算法

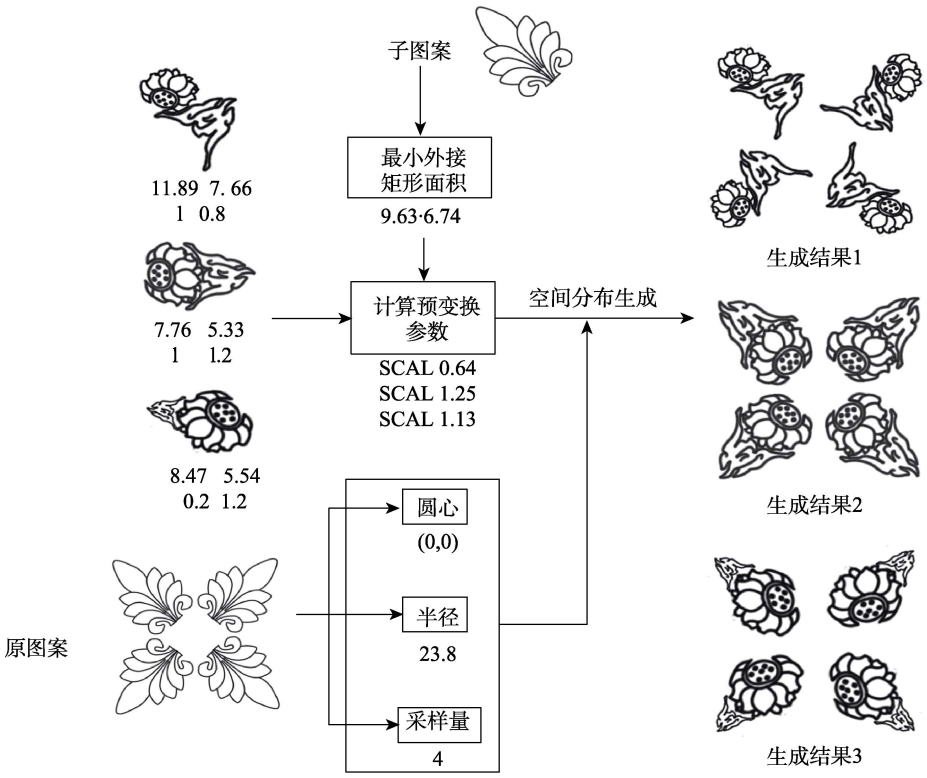
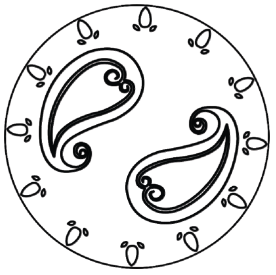


图 10　部分筛选组合生成图案实例



a. 图案样例



b. 特征基元

图 11　图案样例与特征基元的选取

用时 19.2 s, 说明计算机计算相对速度更快.

从实验中集中反映出图案基元匹配算法的一些局限性. 例如, 该算法难以处理结构更复杂的图案基元, 如表 2 中的图案基元 6, 原由是轮廓特征变化较多, 虽然整体相似但局部相似性较差; 该算法要求图案基元间的比例尽可能保持一致性, 得到的计算结果更为可靠, 如表 2 中的图案基元 4.

选取相似性较大图案基元进行匹配与填充, 通过计算选定图案基元的重心与标定位置完成图案基元的填充. 用户可对结果图案进行局部细节

表 2　图案基元匹配算法计算结果

图案基元	图例	与特征基元相似性计算结果	相似度
1			>0.50
2			≥0.50
3			>0.50
4			<0.50
5			>0.50
6			≥0.50
7			>0.50



a. 特征基元 b. 相似性较大 c. 相似性较小

图 12 图案基元相似性人工分类结果

的微调, 直至得到满意结果, 完成图案的检索及匹配设计. 设计结果如图 13 所示.



图 13 图案基元匹配后的设计结果

4 结 语

本文提出一种几何相似特征的石窟造像装饰图案生成方法. 首先定义图案基元, 明确图案的基本属性, 使图案的生成模式得以表达, 具有抽象性强、扩展性好的特点; 然后利用色彩分割和形态学操作提取图案基元轮廓特征, 并基于 Freeman 链码描述图案基元的轮廓信息, 更为客观地描述了图案基元的信息, 为图案基元的组合优化设计提供更好的依据; 再利用 LCS 计算图案基元之间的几何相似特征, 基于计算所得的几何相似特征进行图案基元间组合布局, 既提高了传统图案的设计效率, 也可有效地减少设计师在图案基元库中对于相似图案基元的遴选工作量; 最后根据形态整体度选出更和谐的子图案, 并根据检测的石窟造像装饰图案元素的空间分布特征进行扩充生成, 保证图案设计在视觉上的准确性与和谐度, 提高图案基元的重用率, 使图案设计的过程更为科学化与规则化, 为石窟造像装饰图案设计的多样化设计提供借鉴.

参考文献(References):

[1] Zhang Xinwei, Wang Jin, Lu Guodong, *et al*. Extraction and reuse of pattern configuration based on ontology and shape grammar[J]. Journal of Zhejiang University: Engineering Science, 2018, 52(3): 461-472(in Chinese)
(张欣蔚, 王进, 陆国栋, 等. 基于本体和形状文法的图案构形提取与重用[J]. 浙江大学学报: 工学版, 2018, 52(3): 461-472)

[2] Zhao Haiying, Wang Tingting. Research on the design-oriented ornament pattern gene regeneration algorithm[J]. Journal of Graphics, 2019, 40(4): 810-815(in Chinese)
(赵海英, 王婷婷. 面向设计的装饰纹样基因生成算法研究[J]. 图学学报, 2019, 40(4): 810-815)

[3] Jia Xiaojun, Deng Hongtao, Teng Zi, *et al*. Extraction of image elements for blue calico based on contour fitting[J]. Journal of Textile Research, 2018, 39(8): 150-157(in Chinese)
(贾小军, 邓洪涛, 滕姿, 等. 应用轮廓线拟合提取蓝印花布图案基元[J]. 纺织学报, 2018, 39(8): 150-157)

[4] Kaplan C S. Computer generated Islamic star patterns[J]. Bridges, 2000: 105-112

[5] Hu Wenwen. The design and implementation of Chinese paper-cutting generation method based on its artistic characteristics[D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2017(in Chinese)
(胡文文. 基于艺术特点的中国剪纸生成方法设计与实现[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2017)

[6] Jin Shiyi, Zhou Jiu. Innovative design of fabrics combining jacquard design and printing and clipping with a two-layer effect[J]. Journal of Textile Research, 2020, 41(6): 48-54(in Chinese)
(金诗怡, 周赳. 具有双层效果的提花-印花-剪花织物的设计[J]. 纺织学报, 2020, 41(6): 48-54)

[7] Li Huabiao, Hou Xiaogang, Wang Tingting, *et al*. An unified generation scheme of traditional patterns based on rule learning[J]. Journal of Zhejiang University: Science Edition, 2020, 47(6): 669-676, 680(in Chinese)
(李华飙, 侯小刚, 王婷婷, 等. 基于规则学习的传统纹样统一生成模式研究[J]. 浙江大学学报: 理学版, 2020, 47(6): 669-676, 680)

[8] Zhang M, Guo Q Y, Li L, *et al*. Art deco style generation method based on block filling and style optimization[C]//Proceedings of the 11th International Symposium on Computational Intelligence and Design. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 2018: 234-238

[9] Chen M H, Xu F, Lu L. Manufacturable pattern collage along a boundary[J]. Computational Visual Media, 2019, 5(3): 293-302

[10] Reinert B, Ritschel T, Seidel H P. Interactive by-example design of artistic packing layouts[J]. ACM Transactions on Graphics, 2013, 32(6): Article No.218

[11] Qin Zhen, Ji Tie, Liu Fang, *et al*. The method of product design method based on extension semantics of national pattern primitives[J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2021, 33(10): 1595-1603(in Chinese)

(秦臻, 季铁, 刘芳, 等. 基于民族图案基元可拓语义的产品设计方法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2021, 33(10): 1595-1603)

[12] Tao Chen, Duan Yafeng, Xu Rongrong, *et al*. Modeling and reconstruction of blue calico patterns[J]. Journal of Textile Research, 2019, 40(3): 153-159, 167(in Chinese)
(陶晨, 段亚峰, 徐蓉蓉, 等. 蓝印花布纹样建模与重构[J]. 纺织学报, 2019, 40(3): 153-159, 167)

[13] Jia Xiaojun, Ye Lihua, Deng Hongtao, *et al.* Elements classification of vein patterns using convolutional neural network for blue calico[J]. Journal of Textile Research, 2020, 41(1): 110-117(in Chinese)
(贾小军, 叶利华, 邓洪涛, 等. 基于卷积神经网络的蓝印花布纹样基元分类[J]. 纺织学报, 2020, 41(1): 110-117)

[14] Chen Jiazhou, Hu Wenwen, Miao Yongwei, *et al*. Pattern analysis and digitization modeling of papercutting textures[J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2016, 28(9): 1465-1475(in Chinese)
(陈佳舟, 胡文文, 缪永伟, 等. 剪纸图案的构造模式分析和数字化建模[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2016, 28(9): 1465-1475)

[15] Deng Limiao, Du Hongwei, Han Zhongzhi. Identification of pod beak and constriction and quantitative analysis of DUS traits based on Freeman chain code[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(13): 186-192(in Chinese)
(邓立苗, 杜宏伟, 韩仲志. 基于 Freeman 链码的花生果嘴和果腰图像识别及其 DUS 性状定量分析[J]. 农业工程学报, 2015, 31(13): 186-192)

[16] Li Yue, Tang Di. Design method for paper-cut picture based on decorative pattern[J]. Computer Engineering, 2010, 36(21): 234-236, 238(in Chinese)
(李岳, 唐棣. 基于装饰纹样的剪纸图案设计方法[J]. 计算机工程, 2010, 36(21): 234-235, 238)

[17] Djukanovic M, Berger C, Raidl G R, *et al.* An A search algorithm for the constrained longest common subsequence problem[J]. Information Processing Letters, 2021, 166: Article No.106041

[18] Zhang Shu. Summary on Chinese pattern art[J]. Journal of Nanjing Arts Institute: Fine Arts & Design, 2018(1): 30-43, 213(in Chinese)
(张抒. 中国图案艺术综述[J]. 南京艺术学院学报: 美术与设计, 2018(1): 30-43, 213)

[19] Zhao Lei, Zhang Wen, Sun Zhenguo, *et al*. Brake Pad Image Classification Algorithm based on color segmentation and information entropy weighted feature matching[J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technology, 2018, 58(6): 547-552(in Chinese)
(赵磊, 张文, 孙振国, 等. 基于色彩分割及信息熵加权特征匹配的刹车片图像分类算法[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2018, 58(6): 547-552)

[20] Pramanik R, Bag S. Shape decomposition-based handwritten compound character recognition for Bangla OCR[J]. Journal of Visual Communication & Image Representation, 2018, 50: 123-134

[21] Zhang K, Li X. A graph-based optimization algorithm for fragmented image reassembly[J]. Graphical Models, 2014, 76(5): 484-495