

基于交互式遗传算法的布艺沙发 CMF 情感化设计研究

张晔¹, 陈庆¹, 刘肖健^{1,2}

(1.浙江工业大学, 杭州 310023; 中国美术学院, 杭州 310024)

摘要: **目的** 交互式遗传算法(IGA)是设计方案优化的常用算法,需要基于可视化种群方案做出评价。目前材质设计自动批量生成可视化种群的技术尚不完善,拟解决这一瓶颈问题,为智能优化技术服务于CMF设计提供技术基础。**方法** 对梭织布艺沙发的纹理组织形式进行编码,驱动凹凸贴图的自动生成,开发3D产品CMF设计方案的批量化构建技术,并引入了美观度与视觉体感两个情感化评价指标,通过评价数据识别隐含的设计师意象信息,推进方案的优化与迭代。**结果** 实现了布艺沙发CMF可视化方案的批量生成及其情感化评价、交叉重组、变异等系列遗传操作,以推动CMF设计方案优化。**结论** 案例应用表明,所提出的纹理编码驱动凹凸贴图自动生成方法对3D产品CMF设计方案的批量生成在技术上是可行的,自动渲染的CMF方案在效率和真实感方面可以满足情感指标的交互评价需求。

关键词: 交互式遗传算法; CMF智能化设计; 情感化设计; 梭织

中图分类号: TB472 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2023)16-0079-10

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2023.16.009

Emotional Design of Fabric Sofa CMF Based on Interactive Genetic Algorithm

ZHANG Mi¹, CHEN Qing¹, LIU Xiao-jian^{1,2}

(1.Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, China;

2.China Academy of Art, Hangzhou 310024, China)

ABSTRACT: Interactive Genetic Algorithm (IGA) is a common algorithm for design solution optimization, which needs to be evaluated based on visual population solutions. The technology for automatic batch generation of visual populations for material design is currently imperfect. The work aims to address this bottleneck and provide a technical basis for intelligent optimization techniques to serve CMF design. The texture organization of woven fabric sofas was coded to drive the automatic generation of bump maps, develop a batch construction technique for 3D product CMF design solutions. Two emotional evaluation indicators, aesthetics and visual body feeling were introduced to identify the implicit designer's imagery information through the evaluation data and promote the optimization and iteration of solutions. A series of genetic operations such as batch generation of CMF visualization solutions for fabric sofas and their emotive evaluation, cross recombination, variation, etc. were achieved to promote the optimization of CMF design solutions. The case application shows that the proposed texture coding-driven bump mapping automatic generation method is technically feasible for the batch generation of 3D product CMF design solutions, and the automatically rendered CMF solutions can meet the interactive evaluation needs of emotional metrics in terms of efficiency and realism.

KEY WORDS: interactive genetic algorithm; CMF intelligent design; emotional design; weaving

CMF (Color、Material、Finish) 是色彩、材质、工艺的总称,指产品设计与生产制造过程中对色彩、

材质、工艺的设计与把控^[1]。作为一种感知载体,CMF在情感意象方面的研究有重要意义。交互式遗传算法

收稿日期: 2023-03-11

基金项目: 国家社科基金艺术学重大项目(20ZD09)

作者简介: 张晔(1998—),男,硕士生,主攻CMF设计。

通信作者: 刘肖健(1972—),男,博士,教授,主要研究方向为设计理论与方法。

(IGA)作为一种用户高度参与的智能算法,需要有可视化的方案种群供用户交互评价。目前可自动批量生成的可视化方案种群研究多集中在色彩方面^[2],而用于包含了色彩、材质等多类设计要素的CMF设计需要更复杂的技术支持,特别是在纺织面料的设计领域。

本文主要针对梭织布艺材质自动生成技术进行研究,并结合IGA实现基于感知意象的CMF智能化设计技术,帮助设计师给出准确的感性意象评价,更快速精确地筛选出符合设计要求的方案。

1 研究现状

CMF近年来在工业产品、影视动画、医疗、遥感、纺织等行业都有许多丰富的研究成果^[3],分别体现在色彩和材质领域。

在色彩研究领域,目前面向不同应用目标的色彩表达模型已有几十种之多,配色方案种群生成的系统模型也较为成熟。色彩的语义空间模型近年来逐渐成为了研究重点,这类研究利用神经网络、进化算法、IGA(交互式遗传算法)等相关算法对色彩意象与配色结构进行映射计算。模型主要有两类:一是色彩意象模型,在色彩值、色彩组合和色彩意象或偏好之间建立映射法则;二是用户对自动生成的方案进行交互式评价^[2]。

在材质领域,由于采用扫描、拍摄技术提取材质的方法受到设备精准度的影响较大,具有真实感的材质仿真技术研究更加热门,许多三维应用如keyshot、unity等都具有比较细致的材质编辑功能。近年来随着PBR(一种基于物理规则的渲染模式)的流行,计算机材质仿真目前主要通过色光和纹理映射两个方面来表现^[4]:基于色光的表现形式采用光照模型来体现不同材质的物体对不同的光的反射属性如颜色、反光度、透明度等,这种方式仅能表现简单的材质;纹理映射即贴图,它以纹理图像作为输入,通过定义纹理与物体之间的映射关系,将图像映射到几何形态上合成具有真实感的表面花纹、图案和细微的结构,其中一类用于改变物体表面的图案和颜色,也就是普通的颜色纹理映射,另一类用于改变物体表面的几何属性,如凹凸纹理映射^[5]。在纹理映射中,纹理是颜色、亮度和Alpha等数据的规律性重复矩阵排列,其中的每组独立数值称为一个纹理单元,而纹理单元特征的研究也成为材质仿真中最核心的研究内容^[6]。

近年来有许多不同材质纹理的生成方法被提出:霍达^[7]提出了一种基于双树复小波的色纺针织物计算机仿真方法,提高了仿真针织物的结构相似度;谭茹^[8]重点研究了木纹函数在平面、立方体上的应用并且通过对木纹年轮直径的纹理颜色进行线性插值,使绘制出的木纹年轮之间的颜色变化具有过渡性,更加逼真的模拟了木纹材质;Peng等^[9]通过OpenGL实现了花式纬编针织物的仿真;Zheng等^[10]基于计算机

辅助设计平台,实现圆形纬编转移提花织物的可视化仿真;赵烨梓^[11]基于生成对抗神经网络的高分辨率SVBRDF材质生成方法可以在法线、漫反射、镜面反射、粗糙度等4个通道上获得更加精确的预测结果。

单独的配色技术与材质生成技术的研究都比较丰富,但对方案种群的自动生成两者各有不足。配色技术由于其实现技术简单、工具多样,一般CAD都可以实现,种群生成研究相对丰富,其不足之处在于对配色设计本身的一些深层问题的关注不够,如对色彩组合的选择原则、色区邻接特性、色彩意象再现等关键问题数学本质的建模欠缺^[12]。而材质批量化生成技术尚少见文献,现有的一些研究也是在给定材质贴图上的有限排列组合,缺乏可自主编辑的材质仿真种群方案生成研究。

CMF跟外观设计息息相关,因此其设计方案的评价包含很多情感化指标,如运用专家系统、神经网络模型和遗传算法等计算机技术建立系统性框架,通过获取用户对产品属性的感性意象,并找到他们的主观反应和设计特征之间的定量关系,进而对设计过程进行指导和评估^[13]。

CMF的情感化设计近年使用量化方法的研究较多,主要是量化用户情感层次与产品视觉要素之间的关系:甘艳等^[14]将感性认知测量结果与人工智能技术的结合,提高了用户的感性测量计算及设计应用方法的效率;张宝等^[15]提出基于感性工学的蓝牙音箱的CMF设计方法研究,运用问卷调查法筛选感性意象词汇,语义差分法获取感性词汇与CMF样本映射关系,定性和定量的方法提取蓝牙音箱的CMF设计元素等。

CMF情感化设计研究的主要问题是多数研究给出的CMF方案的编码结构极度简化,有的甚至只是在有限的组合方案集合中做选择,而各类感性词汇描述的意象目标则远比编码复杂。简陋的CMF方案难以承载含义丰富的感知意象目标,强行匹配映射只能给出大致的推荐方向而难以形成精确的解决方案。基于上述问题,本文提出了一种CMF方案种群化生成的解决方案,实现了梭织纹理与色彩的自主编辑与批量生成,并结合IGA直接面向设计者意象偏好对种群方案进行了迭代与优化,生成了最符合设计者情感意象的CMF方案。

2 方法架构

本文的方法以IGA为基本框架,整体架构见图1,由两个模块组成:一是种群(即批量化CMF设计方案)的形成,包括参数设定、灰度生成、光效渲染和三维映射;二是情感化评价与迭代优化,由意象评价、迭代优化、方案导出组成。

生成种群方案的流程见图2,本文的工作基于二维平台CorelDraw和三维平台Rhino完成。

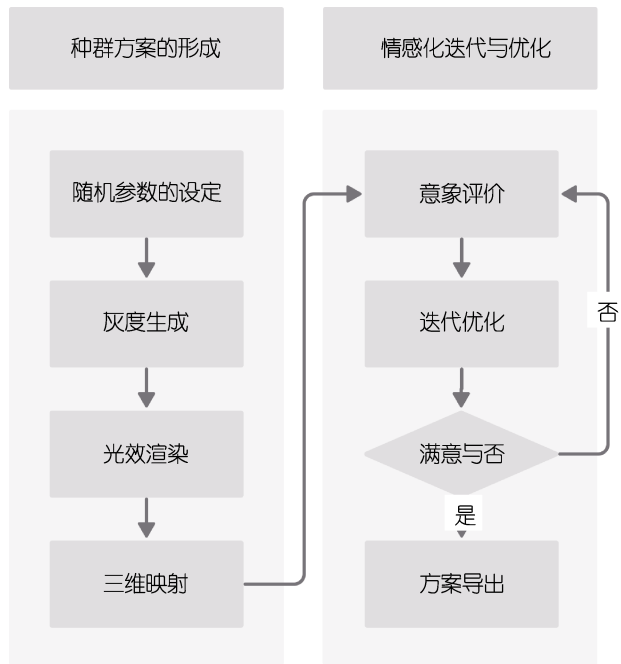


图 1 方法整体架构
Fig.1 Overall structure of method adopted

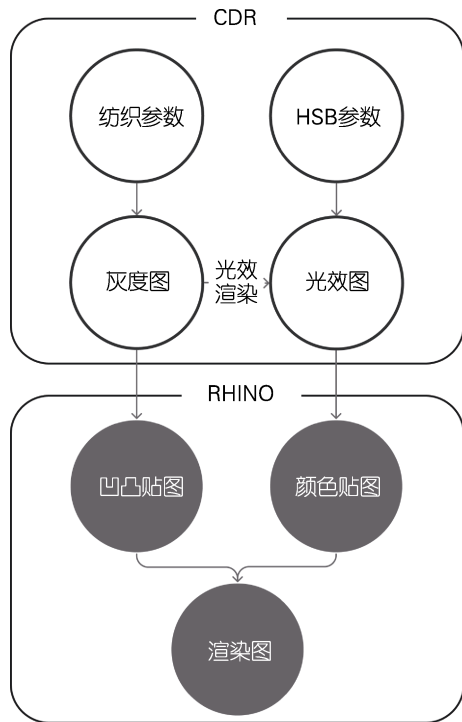


图 2 种群方案形成过程
Fig.2 Process of population solution formation

根据 PBR 基于物理规则的贴图渲染原理，三维方案需要由表达表面色彩与纹样的颜色贴图和表达表面纹路高度起伏的凹凸贴图在渲染平台经过纹理映射生成，在本系统中，这两类平面贴图在 CorelDraw 中生成，在 Rhino 中渲染产品模型。

具体实现流程如下：用户在 CorelDraw 中设定好材质的各类参数范围与色彩的取值范围后，根据纹理单元的数学特征规律，批量化计算生成表达方案表面

纹路凹凸的灰度图（见图 3），再由灰度图模拟真实光照批量化渲染出光效图。



图 3 灰度光效
Fig.3 Grayscale and light effects

在 Rhino 中，将 CorelDraw 内生成的灰度图与光效图种群导入用户事先准备好的三维模型文件内，并调用 Rhinoscript 的指令集将贴图种群映射至给定的模型上，最后批量生成三维渲染效果图。

种群方案形成后进入迭代优化流程，该模块基于 IGA 实现，主要操作方式为给生成的种群方案打分，根据方案得分对方案进行迭代优化。在 CMF 情感化设计中，一般做法是在感知意象和设计参数间建立映射法则，但由于用户感知意象的复杂性，很难直接通过固定的映射法则表达完整，而 IGA 则可以辅助用户将 CMF 设计理念中隐性的、不易模型化的特征通过人机交互评价行为表现出来，并体现在方案中。

3 种群方案的形成

3.1 设计对象编码

种群方案基于布艺材质的灰度图和光效图生成，第一步需要进行编码设计，明确设计参数。在本系统中参数分为纺织参数和颜色参数，灰度图的生成与纺织参数相关，光效图的生成与颜色和纺织参数都相关。

确定灰度图纺织参数需要先研究材质纹理单元的数学规律^[16]。梭织结构分为平纹、斜纹与缎纹三种纹样，本文采用适用度最广的平纹进行研究。梭织结构由正交的经纱与纬纱经过一定规律交织形成，其结构仅有经纱压住纬纱和纬纱压住经纱两种情况，经纱在上称为经组织点，纬纱在上称为纬组织点，所以梭织的结构也可由经组织点与纬组织点构成的组织循环图表示。最小构成单位的组织循环图称为单元组织循环，而最简单的单元组织循环又叫原组织，各种丰

富的面料结构就是在原组织上演化而成。平纹梭织面料的结构和原组织，见图 4。

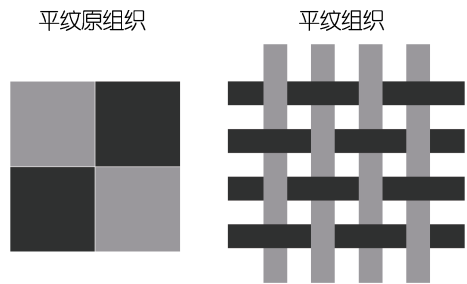


图 4 平纹结构及原组织
Fig.4 Structure and original organization of plain weave fabric

平纹的面料变化就是在其原组织基础上用多个组织点代替原有的一个组织点实现。如图 5 所示是几种不同的变化形式。其变化形式可以归纳成替换的纱线根数（如第一组是经纱 2 纬纱 1，第二组是经纱 1 纬纱 2，第三组是经纱 2 纬纱 2），所以纱线根数是确认灰度图组织循环变化形式的重要编码参数。另外根据纺织原理可知面料由纱线直径控制粗细度、纱线间隔控制稀密度，所以本系统需要控制的纺织参数有纱线直径、纱线间隔和纱线根数三个参数。

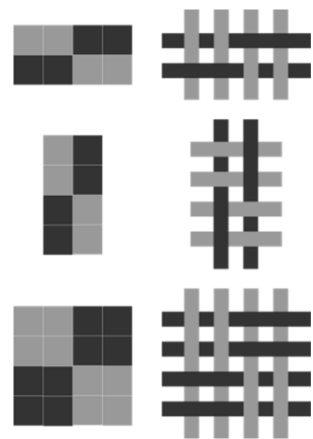


图 5 平纹变化组织
Fig.5 Variation structure of plain weave fabric

光效图由灰度图渲染形成，就是在灰度图的基础上添加材料色彩，本文所使用的 HSB 色彩模型通过色相（H）、饱和度（S）和明度（B）三个参数决定色彩。

综上所述，本文所使用编码基因如表 1，经研究发现单色沙发市场占有率最高，仿真对象选定为单色布面，其中纺织参数数值是通过对比布艺棉麻沙发进行市场调研和文献调研得到。

表 1 CMF 编码参数
Tab.1 CMF coding parameters

编号	参数名称	定义	定义域/单位
1	色相（H）	布艺材质的色相值，表示材质色调	0~360
2	饱和度（S）	布艺材质的饱和度，表示灰度占比	0~1
3	明度（B）	布艺材质的明度值，表示亮度高低	0~1
4	纱线直径/mm（经纱）	经纱纱线粗细尺寸，表现材质粗糙度	0.1~0.4
5	纱线直径/mm（纬纱）	纬纱纱线粗细尺寸，表现材质粗糙度	0.1~0.4
6	纱线间隔/mm（经纱）	经纱间间隔尺寸，表现材质稀密性	0~0.05
7	纱线间隔/mm（纬纱）	纬纱间间隔尺寸，表现材质稀密性	0~0.05
8	纱线数量/根（经纱）	经纱单元数量，表现组织形式	1、2、3、4
9	纱线数量/根（纬纱）	纬纱单元数量，表现组织形式	1、2、3、4

3.2 灰度图的生成

梭织结构的主要数学特征为纱线的曲线形态，如图 6 所示为截面图，其形态可以用两组相互交织的正弦波函数来表示。

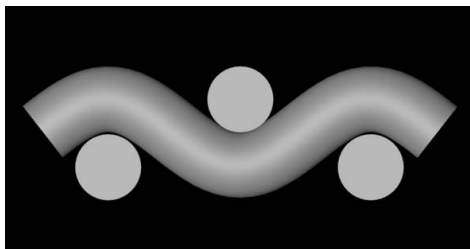


图 6 纺织结构截面图
Fig.6 Cross-sectional view of textile structure

梭织结构灰度图的生成过程就是运用梭织参数来控制两组函数在 CorelDraw 空间进行交织，其生成原理如下。

建立梭织结构参数与正弦波函数参数之间的转化关系，输入梭织参数后将其转化为正弦波的各个参数，然后利用得到的正弦参数即可生成对应形态的正弦函数纱线组（即梭织结构），其中正弦函数纱线组的生成并不需要真正建立 3D 模型，而是运用算法在 CorelDraw 空间将正弦纱线上每一个像素点的灰度值计算出来，最后将得到的所有灰度值写入图片文档后即可生成梭织结构灰度图。

计算纱线灰度值首先需要建立三维灰度空间如图 7（作者自绘），其中 CorelDraw 页面宽度方向为 x 轴、页面高度方向为 y 轴，灰度数值为 z 轴，灰度值

即 z 轴取值范围为 0~255 的整数, z 轴数值越大灰度值越高。

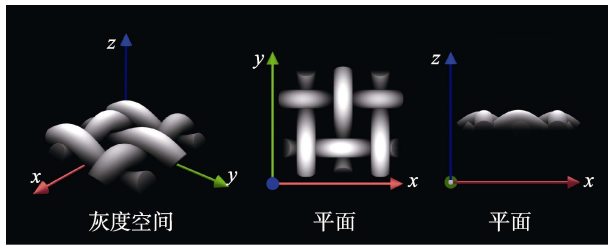


图 7 灰度空间

Fig.7 Diagram of grey space

在灰度空间建立交织结构的步骤如下。

1) 根据纱线结构计算页面中每个像素对应的高度 (z 轴) 数值;

2) 将像素高度值对应成灰度值储存在数组中;

3) 将灰度值数组进行映射渲染生成灰度图。

其中每根纬纱和经纱 z 向高度的函数表达式见式 (1)。

$$\begin{cases} z(x) = \Delta z_x + \Delta z_x \sin((2\pi x / T_x) + (k+1)\pi) + r_x \sin \alpha_x \\ z(y) = \Delta z_y + \Delta z_y \sin((2\pi y / T_y) + k\pi) + r_y \sin \alpha_y \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} \Delta z_x = r_y + w_y \times \frac{n_y}{2} \\ \Delta z_y = r_x + w_x \times \frac{n_x}{2} \end{cases} \quad (2)$$

式中: r 是纱线半径; w 是纱线间隔; n 是纱线根数; Δz 表示正弦纱线峰值, 由纱线半径、间隔和纱线根数确定, 因为灰度值的值为 0~255, 所以要将高度统一抬升一个峰值保证最低点灰度值大于 0; T 表示纱线函数最小正周期; k 是控制初相位参数, 与纱线的奇偶行数相关; α 是像素点与纱线轴线夹角, $r \sin \alpha$ 表示像素点在纱线圆管上的高度。

由式 (1) — (2) 可以得到每根经纬纱线的高度值从而形成整个灰度图高度数组, 见式 (3)。

$$\begin{cases} f(x) \\ f(y) \end{cases} \quad (3)$$

根据不同的纱线参数可以得到灰度图种群灰度值矩阵, m 值为灰度图数量。

$$N = \begin{bmatrix} f(x)_1 & f(y)_1 \\ \vdots & \vdots \\ f(x)_m & f(y)_m \end{bmatrix} \quad (4)$$

其中存在的一个问题是经纱和纬纱交叠处的像素将会同时存在经向和纬向两个高度数值, 在映射前需要判断采用哪个数值, 因为需要映射的像素都为圆管截面圆的上半部分, 所以采用高于正弦曲线对称中心点的数值即可。

经过高度值数组的梳理, 就可以根据式 (4) 矩阵数值进行灰度映射操作, 生成 m 张不同参数的梭织材质灰度图, 见图 8。

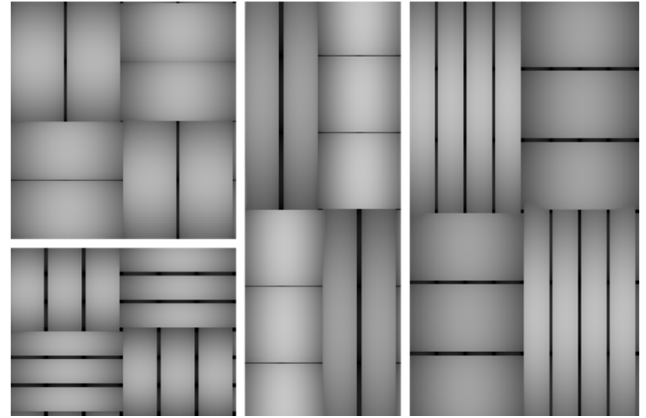


图 8 灰度图种群

Fig.8 Greyscale map population

3.3 光效渲染

灰度图形成后, 对灰度图进行光效渲染, 可以形成光效图。CorelDraw 作为二维平台, 没有渲染模块, 为了模拟光照效果, 首先要建立光学模型。光源可以有很多种形式, 本文使用了最常用的平行光, 即纹理平面上每一点的光照方向都是一样的。

光照模型有很多种^[17], 织物表面粗糙, 可以采用漫反射模型来表示, 见图 9。

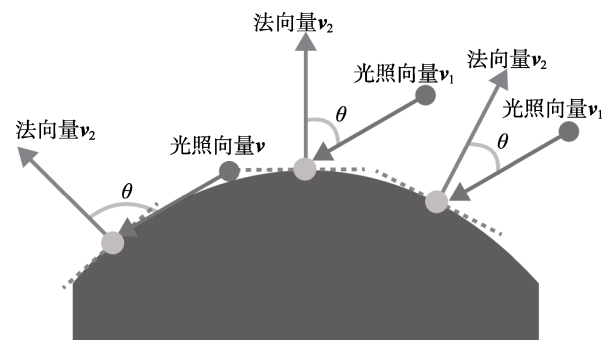


图 9 光照模型

Fig.9 Schematic diagram of lighting model

用向量 v_1 来表达平行光方向, v_2 表示编织表面像素点的法向量, 由于各个方向反射量均等, 纹理曲面上每一点的亮度仅与该点法向量与光线方向的夹角 θ 成反比, 与观察点位置无关。具体来说: 如果 θ 为 0° , 则表示该点处于光线直射状态, 相当于正午太阳当头, 最亮; θ 越大, 太阳越偏西, 地面也就越暗; θ 超过 90° , 太阳下山, 该点处于背阴状态, 为纯黑色。因此, 这个模型需要计算出每一点的曲面法向量 v_2 , 然后与光线向量 v_1 求夹角 θ , 依据夹角计算该点明度, 向量夹角的计算方法见式 (5)。

$$\cos \theta = \frac{v_1 \times v_2}{\|v_1\| \times \|v_2\|} \quad (5)$$

v_1 为系统定义, 所以只需要计算曲面的法向量 v_2 , 本文采用三角网格索引的方式实现, 在计算点的坐标位置周围寻找三个点, 利用这三点构成的平面的

法向近似表达该点的曲面法向, 计算方法见式 (6)。

$$\begin{cases} \mathbf{v}_2 = (x, y, z) \\ x = (y_2 - y_1)(z_3 - z_1) - (z_2 - z_1)(y_3 - y_1) \\ y = (z_2 - z_1)(x_3 - x_1) - (z_3 - z_1)(x_2 - y_1) \\ z = (x_2 - x_1)(y_3 - y_1) - (x_3 - x_1)(y_2 - y_1) \end{cases} \quad (6)$$

式 (6) 中, $\mathbf{v}_2$ 的坐标可以在灰度映射模块的式 (4) 中读取, 而 (x_1, y_1, z_1) 、 (x_2, y_2, z_2) 、 (x_3, y_3, z_3) 为平面三点的坐标, 可以在式 (4) 中读取该点左方、上方、右下方三点坐标得到并形成三角面。

光照模型完成后就可以进行光效渲染, 对有色材质采用两段式线性插值方法近似表达其在光照环境下的色彩变化。

本文采用 HSB 色彩模式定义材质颜色^[18], 其圆柱形极坐标色彩模型如图 10 所示, 由色相、明度、饱和度组成, 明度值和饱和度的范围为 0~1, 色相的范围为 0 度~360 度, 系统会在操作者选择的范围中随机生成一种颜色, $x(\alpha, r_{\text{饱和度}}, z_{\text{明度}})$, 并储存在数组中进行后续的光效渲染。

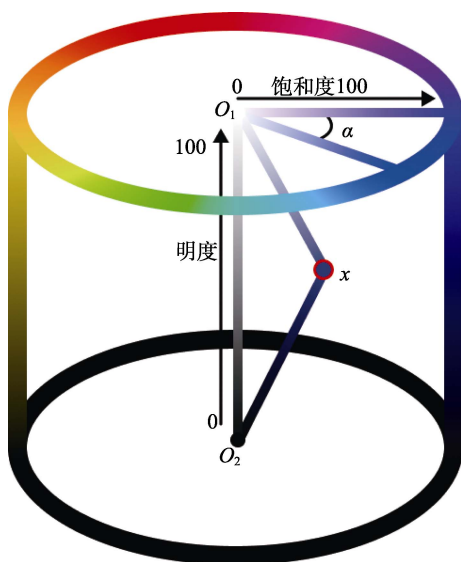


图 10 HSB 色彩模型
Fig.10 HSB colour model

前文可知明度值（灰度值）可以由曲面法向与光线矢量的夹角 θ 表示, 换言之灰度映射就是将夹角 θ 从 0°~90°转化为纯白到纯黑两色之间的灰度(也就是 HSB 坐标中的纯白点 $O_1(0, 0, 1)$ 到纯黑点 $O_2(0, 0, 0)$ 两坐标点之间的直线, 如图 10)。

同理, 彩色映射则是在灰度渲染的首尾两点中插入选择的色彩的圆柱极坐标点 $x(\alpha, r_{\text{饱和度}}, z_{\text{明度}})$ 形成一条色值折线 O_1xO_2 , 将 θ 从 0°~90°映射到这条折线上。

因此光效渲染的流程就是计算纹理表面每个像素点的向量夹角 θ , 根据各个像素的角度值将其在色值折线上映射得到一个色彩值, 并赋予对应像素点。

根据上述模型计算, 渲染得到的光效图见图 11。

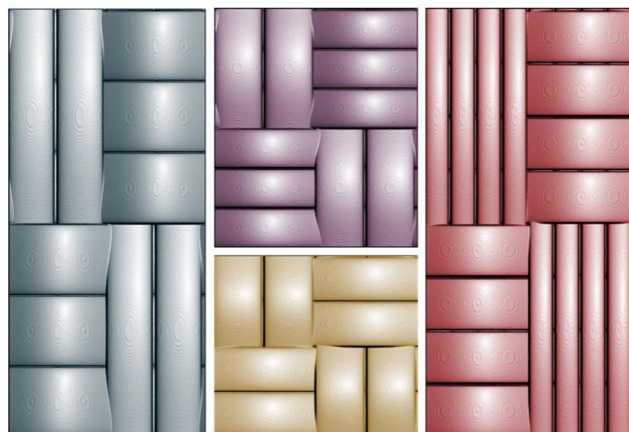


图 11 光效图种群
Fig.11 Batch light effect map

3.4 产品种群展示

灰度映射和光效渲染分别得到了凹凸贴图和颜色贴图, 将其呈现到真实三维沙发模型上在 Rhino 中实现。

操作流程见图 12, 用户首先需要自主将单个沙发模型导入 Rhino 中并放置在后台, 通过 CorelDraw 的调用, 系统会自动将批量生成的凹凸贴图和颜色贴图映射渲染, 并保存渲染图返回到 CorelDraw 页面中展示, 由于完整的模型展示不能完全表现纹理细节, 所以渲染视角为能表现沙发造型细节的角度, 最终种群方案图见图 13。

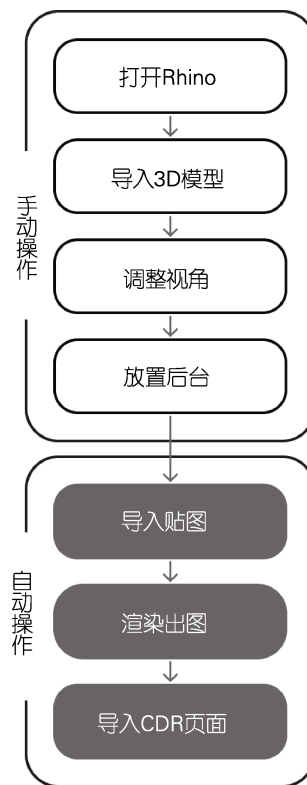


图 12 种群方案生成操作流程
Fig.12 Operation process of population solution generation



图 13 种群方案效果
Fig.13 Population scheme renderings

其中需要注意的是,在代码中调节材质贴图 UV 参数用户需要先将模型先转化为 Mesh 属性,然后系统通过识别贴图分辨率来进行 UV 调节。

4 基于 IGA 的情感化设计

情感化设计的目的一般都在于研究用户的意象偏好来指导优化设计,常用的研究方法是寻找意象形容词汇与产品设计参数之间的映射规律,但不同的用户对抽象词汇的理解各不相同,模糊中介的增加更容易导致误差产生。本文避免了中介转化这一步,直接面向用户探究其意象偏好情况^[2]。

4.1 布艺沙发的意象评价

IGA 的交互方式体现为设计师对自动生成的 CMF 方案的喜好评价,经过布艺材质喜好评价的调研后发现,用户对布艺材质的喜好程度主要由视觉美观程度和材质质感属性决定。质感是由触觉所引起的,但大部分触觉感受可以经过人的经验积累转化为视觉的间接感受^[19]。所以对布艺这类平时接触较多的材质,可以根据以往的触觉经验通过视觉印象判断该材料的材质,从而形成材料的“视觉体感”。

因此,本文对 CMF 方案的意象评价引入了两个喜爱度指标:美观度和视觉体感。评价的方式为打分法,用户给两个指标分别赋分后经过计算得到用户对此 CMF 方案的喜爱程度^[20]。评价指标的计算有线性和非线性多种形式,作为初步尝试,采用了上述两个指标的线性方程来表示,见式(7)

$$A = \frac{c_1}{c_1 + c_2} B_1 + \frac{c_2}{c_1 + c_2} B_2 \quad (7)$$

式中: A 为用户对评分方案的喜爱度; B_1 和 B_2

分别为用户给出的美观度和视觉体感的得分,范围为 0~10 分; c_1 和 c_2 分别为美观度和视觉体感的系数,决定其在喜爱度中的权重占比,范围为 0~1,由于个人喜爱偏好的差异,这两个系数是灵活的,用户可以根据自身喜爱偏好在操作界面中进行设定。

4.2 迭代变异

IGA 的原理是模拟生物种群的优胜劣汰,通过个体的交配繁衍迭代演化直至产生最优个体。用户给出的意象评价喜爱度即“适者生存”中的适者的评判指标,另外用户同样需要给出喜爱度阈值即淘汰值来推动筛选进行,高于此分值的方案能够保留进入下一轮,低于此分值的方案不会直接被淘汰,根据喜爱度得分,其编码基因将有机会保存在新的子代种群方案中。种群换代的机制见图 14 所示,包括两个部分,交叉重组和基因变异。

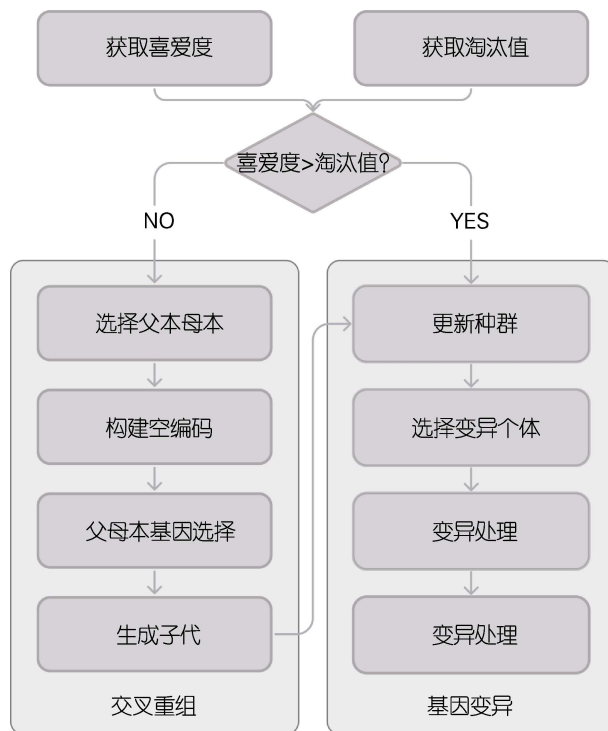


图 14 种群换代机制
Fig.14 Population turnover mechanism

交叉重组指被淘汰的方案选取父本母本进行重新编码。选择方法为轮盘赌算法,按照初代种群各个方案的喜爱度在总喜爱度中的占比作为概率随机选择两个方案作为父本与母本,喜爱度越高的个体被选中的概率越大,但也不排除喜爱度低的个体,能保持一定的物种多样性,防止过早陷入局部最优解,见式(8)。

$$R_i = \frac{C_i}{\sum_{j=0}^n C_j} \quad (8)$$

式中: R_i 代表第 i 个方案被选为父母本的概率;

C_i 是此方案的喜爱度得分； n 是种群大小，即种群方案的数量。

在父本母本选择完毕后需要构建一个子代空编码方案，并由父母本组合生成新的基因，需要填充的编码基因参数见式（9），填充的方法为从两个父母本方案中随机选择编码参数遗传至子代方案中，全部基因遗传完成后就形成了一个新的个体。重复操作交叉重组操作补充种群个体数量，直到种群大小恢复。

$$N_i = \begin{cases} H_i, S_i, B_i, \\ \text{经纱直径}, \text{纬纱直径}_i \\ \text{经纱间隔}, \text{纬纱间隔}_i \\ \text{经纱根数}, \text{纬纱根数}_i \end{cases} \quad (9)$$

交叉重组完成后形成了新的种群编码，与自然种群进化过程相似，在 IGA 进化过程中同样有变异发生。根据用户设置的变异率，系统在新种群中随机选择一批方案在设定的变异范围内波动编码参数。至此，新的种群编码已经形成，将其解码展示新的种群方案并重置其喜爱度后就完成了一个完整的种群进化过程。

5 原型系统与案例应用

5.1 原型界面的设计

布艺沙发 CMF 情感化设计插件的二次开发在 CorelDraw 上完成，通过文档内嵌宏的形式运行，插件界面见图 15。原型界面呈竖长形，其功能模块按照运行流程从上至下排布。



图 15 原型界面
Fig.15 Prototype interface

5.2 系统运行示例

本文在 CorelDraw2021 版本和 Rhino7 版本上运行了本系统。首先将准备好的 Rhino 沙发模型导入 Rhino 软件中，调整好渲染视角后放置在后台；其次打开 CorelDraw，运行宏代码设置参数如图 15 所示；再次点击“批量方案”按钮，CorelDraw 会运行程序批量生成灰度图与光效图，保存在本地指定文件夹中，Rhino 从此文件夹中自动调取生成贴图进行渲染，渲染完成后输出渲染图在另一指定文件夹中；最后 CorelDraw 自动调入渲染图，按顺序进行摆放后形成方案种群，见图 16。

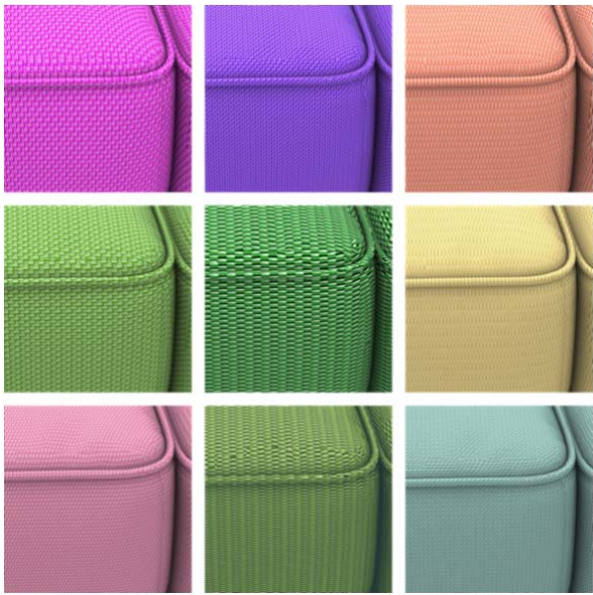


图 16 初代方案种群
Fig.16 Primary solution population

接下来进行情感评价操作，按照个人意象喜爱度从美观度和视觉体感两个方面给出评分，选中一个方案，输入评分，点击“更新评分”，可以记录此方案的得分并展示，详细评分页面如图 17 所示，用户也可以根据自身喜好偏向设置评分权重，系统会记录最后一次数据。

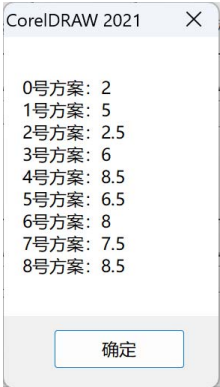


图 17 详细评分页面
Fig.17 Detailed scoring page

情感评价得到喜爱度参数后进行迭代优化操作,在界面里设置淘汰值和变异率,点击“种群换代”,评分超过淘汰值的方案保存至下一代种群中,低于淘汰值的方案需要生成新方案进行替换,新方案的编码则是根据得分在旧种群中用轮盘赌算法选出两个父本方案,再从两个方案中随机抽取编码参数得到。迭代完成后进行种群变异操作,根据用户设置的变异率,新种群中有一定比例方案的编码参数会进行波动变化,形成最终的新种群编码。最后系统解码此编码

组,就得到了融合个人喜爱度的新种群方案。

重复以上步骤,得到第 2 代、第 3 代、第 4 代种群(如图 18 所示),其中第 4 代种群中方案 5 颜色柔和适合家居,视觉体感较柔软舒适,是用户最满意的一款方案。

选中此方案,点击“参数预览”可以查看此方案的纱线和 HSB 参数;点击“方案生成”,会重新生成一个 CorelDraw 页面,包含此方案的光效图、灰度图、三维效果图和参数,见图 19。

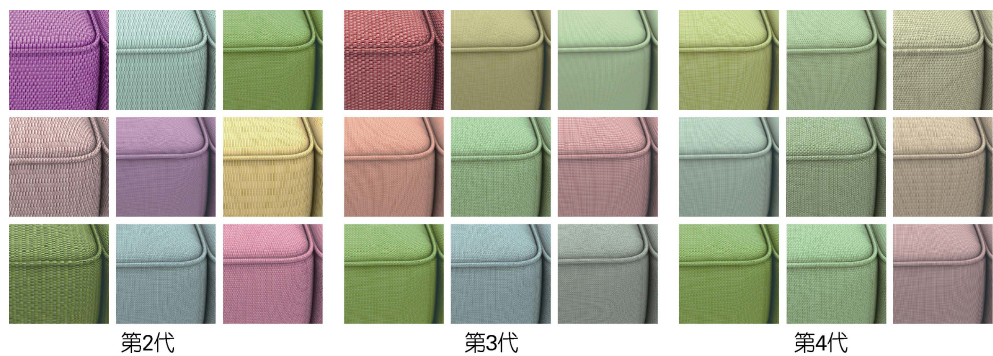


图 18 迭代种群方案
Fig.18 Iterative population solution

颜色: H:97 S: 33 B: 70
直径: 经0.19 × 纬 0.18 mm
间隔: 经0.01 × 纬 0.005 mm
根数: 经3 × 纬 2 根

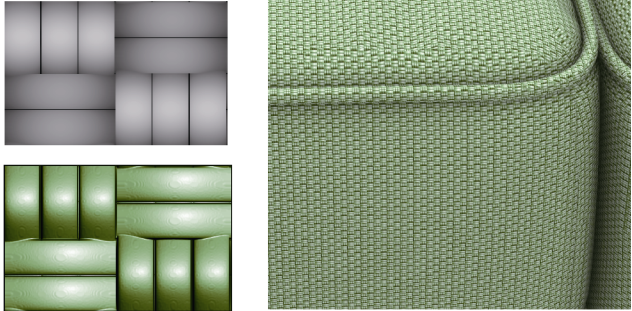


图 19 方案导出页面
Fig.19 Scheme export page

6 结语

本文验证了纹理单元编码驱动的凹凸贴图自动生成方法的可行性,实现了 3D 产品的 CMF 方案的批量生成技术,搭建了基于 IGA 的 CMF 方案情感化迭代优化系统。案例表明,使用自动生成的贴图渲染得到的批量 CMF 方案能满足交互评价在真实感与效率方面的需求,直接面向操作者意象偏好评价的 IGA 优化系统能更准确高效得到最优设计方案。

本文针对纺织材质实现了 CMF 方案批量生成技术并进行了验证,后续纺织材质和其他材质的进一步研究可以在其基础上进行。

参考文献:

[1] 侯宇康. 基于深度学习的产品 CMF 创新设计系统开

发及应用[D]. 贵阳: 贵州大学, 2021.

HOU Yu-kang. Development and Application of Product Cmf Innovative Design System Based on Deep Learning[D]. Guiyang: Guizhou University, 2021.

[2] 朱昱宁, 徐博群, 刘肖健. 基于交互式遗传算法的参考图像辅助配色设计[J]. 包装工程, 2020, 41(2): 181-188.

ZHU Yu-ning, XU Bo-qun, LIU Xiao-jian. Reference Image Aided Color Matching Design Based on Interactive Genetic Algorithm[J]. Packaging Engineering, 2020, 41(2): 181-188.

[3] 刘建军, 徐娟, 孙彪. 我国 CMF 研究热点主题与演进趋势——基于 CiteSpace 的文献计量分析[J]. 设计, 2021, 34(1): 92-95.

LIU Jian-jun, XU Juan, SUN Biao. Hot Topics and Evolution Trends of CMF Research in China—Bibliometric Analysis Based on CiteSpace[J]. Design, 2021, 34(1): 92-95.

[4] 王可. 计算机辅助材质、装饰及灯光设计的理论方法研究和应用[D]. 西安: 西北工业大学, 2002.

WANG Ke. Research and Application of Computer Aided Material, Decoration and Lighting Design Theory and Method[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2002.

[5] 陈斌. 三维图形引擎中凹凸纹理映射技术的研究与实现[D]. 成都: 电子科技大学, 2006.

CHEN Bin. Research and Implementation of Bump Texture Mapping Technology in 3D Graphics Engine[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2006.

[6] 刘丽, 赵凌君, 郭承玉, 等. 图像纹理分类方法研究进展和展望[J]. 自动化学报, 2018, 44(4): 584-607.

- LIU Li, ZHAO Ling-jun, GUO Cheng-yu, et al. Texture Classification: State-of-the-Art Methods and Prospects[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2018, 44(4): 584-607.
- [7] 霍达. 色纺针织物计算机仿真算法设计与真实感评价[D]. 武汉: 武汉纺织大学, 2022.
- HUO Da. Computer Simulation Algorithm Design and Realistic Evaluation of Yarn-Dyed Knitted Fabric[D]. Wuhan: Wuhan Textile University, 2022.
- [8] 谭茹. 计算机图形学中纹理生成研究[D]. 大连: 辽宁师范大学, 2007.
- TAN Ru. Research on Texture Generation In Computer Graphics[D]. Dalian: Liaoning Normal University, 2007.
- [9] PENG Jia-jia, JIANG Gao-ming, XIA Feng-lin, et al. Deformation and Geometric Modeling in Three-Dimensional Simulation of Fancy Weft-Knitted Fabric[J]. *Textile Research Journal*, 2020, 90(13-14): 1527-1536.
- [10] ZHENG Pei-xiao, JIANG Gao-ming. Modeling and Realization for Visual Simulation of Circular Knitting Transfer-Jacquard Fabric[J]. *Textile Research Journal*, 2021, 91(19-20): 2225-2239.
- [11] 赵烨梓. 基于 GAN 的高分辨率 SVBRDF 重建方法[D]. 济南: 山东大学, 2021.
- ZHAO Ye-zi. Reconstruction Method of High Resolution Svbrdf Based on GAN[D]. Jinan: Shandong University, 2021.
- [12] 刘肖健, 贾莹莹, 徐博群. 配色设计研究现状综述[J]. *包装工程*, 2021, 42(14): 92-100.
- LIU Xiao-jian, JIA Ying-ying, XU Bo-qun. Review on the Study of Color Design[J]. *Packaging Engineering*, 2021, 42(14): 92-100.
- [13] 陈永康, 江雨豪, 何人可, 等. 基于文献计量学的情感化设计研究进展、热点与趋势分析[J]. *包装工程*, 2022, 43(6): 32-40.
- CHEN Yong-kang, JIANG Yu-hao, HE Ren-ke, et al. Emotional Design Trends and Research Progress: A Scientometric Analysis-Based Study[J]. *Packaging Engineering*, 2022, 43(6): 32-40.
- [14] 甘艳, 纪瓔芮, 师宇哲, 等. 用户感性认知与产品感性设计方法及应用[J]. *包装工程*, 2021, 42(2): 22-27.
- GAN Yan, JI Ying-rui, SHI Yu-zhe, et al. Method and Application of User Kansei Perception and Product Kansei Design[J]. *Packaging Engineering*, 2021, 42(2): 22-27.
- [15] 张宝, 胡安国, 张迪. 基于感性工学的蓝牙音箱 CMF 设计方法研究[J]. *包装工程*, 2021, 42(8): 156-161.
- ZHANG Bao, HU An-guo, ZHANG Di. CMF Design Method of Bluetooth Speaker Based on Perceptual Engineering[J]. *Packaging Engineering*, 2021, 42(8): 156-161.
- [16] 陈益人. 机织物组织与结构[M]. 北京: 中国纺织出版社, 2021.
- CHEN Yi-ren. Woven Fabric Weave and Structure[M]. Beijing: China Textile & Apparel Press, 2021.
- [17] 叶子鹏, 夏雯宇, 孙志尧, 等. 从传统渲染到可微渲染: 基本原理、方法和应用[J]. *中国科学: 信息科学*, 2021, 51(7): 1043-1067.
- YE Zi-peng, XIA Wen-yu, SUN Zhi-yao, et al. From Traditional Rendering to Differentiable Rendering: Theories, methods and Applications[J]. *Scientia Sinica (Informationis)*, 2021, 51(7): 1043-1067.
- [18] 邱子宸, 周橙旻, 詹先旭, 等. 基于 HSB 色彩模型的意大利沙发配色设计[J]. *家具*, 2020, 41(3): 41-45.
- QIU Zi-chen, ZHOU Cheng-min, ZHAN Xian-xu, et al. Color Matching Design of Italian Sofa Based on HSB Color Model[J]. *Furniture*, 2020, 41(3): 41-45.
- [19] 马君. 视觉质感在包装设计中的建构方法及拓展价值研究[D]. 无锡: 江南大学, 2015.
- MA Jun. Research on the Construction Method and Expanding Value of Visual Texture in Packaging Design[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2015.
- [20] XU Bo-qun, LIU Xiao-jian, LU Chun-fu, et al. Transferring the Color Imagery from an Image: A Color Network Model for Assisting Color Combination[J]. *Color Research & Application*, 2019, 44(2): 205-220.

责任编辑: 陈作