

基于四边形网格剖分的可计算区域填充方法

徐绕山^{1,2},袁苇航²,孙正兴²

(1. 南京信息职业技术学院 计算机与软件学院,南京 210023;

2. 南京大学 计算机软件新技术国家重点实验室,南京 210046)

摘要:针对在一定形状限制条件下的可形变填充问题,提出一种可计算填充方法。对目标区域和填充样板进行四边形网格剖分。给出在样板拼接、边界、旋转、最小形变等约束条件下的整型规划,使用填充样板在填充区域中进行离散拼接,并通过全局优化迭代样板形变,以达到理想的填充效果。实验结果表明,该填充方法对目标区域的有效覆盖率以及边缘拟合度与约束限制无直接关系,在指定约束条件下,能较好地达到区域填充效果。

关键词: 四边形网格;区域填充;离散拼接;整型规划;形状约束;全局优化

中文引用格式:徐绕山,袁苇航,孙正兴. 基于四边形网格剖分的可计算区域填充方法[J]. 计算机工程,2017,43(5):299-305,312.

英文引用格式:Xu Raoshan, Yuan Weihang, Sun Zhengxing. Computable Region Filling Method Based on Quadrilateral Mesh Split[J]. Computer Engineering, 2017, 43(5):299-305,312.

Computable Region Filling Method Based on Quadrilateral Mesh Split

XU Raoshan^{1,2}, YUAN Weihang², SUN Zhengxing²

(1. Institute of Computer and Software, Nanjing College of Information Technology, Nanjing 210023, China;

2. State Key Laboratory for Novel Software Technology, Nanjing University, Nanjing 210046, China)

[Abstract] This paper proposes a computable filling method, aiming at the problem of deformable filling under certain shape constraint conditions. Quadrilateral mesh split of the target area and filling template is done. Integer planning is presented under constraint conditions such as template connecting, boundary, rotation, minimum deformation, etc. Discrete splicing in filling area is realized using filling template. Through the global optimization, model deformation is iterated, so as to achieve the desired filling effect. Experimental results show that the proposed filling method has no direct relationship with the constraints in domain coverage ratio of target area and edge fitting degree, and it can better achieve region filling under the specified constraints.

[Key words] quadrilateral mesh; domain filling; discrete splicing; integer planning; shape constrains; global optimization

DOI:10.3969/j.issn.1000-3428.2017.05.049

0 概述

区域填充计算是运算化设计的重要组成部分,所解决的问题是采用合适的样板形状将给定目标区域内部填充完整。主要包括 2 类:第 1 类允许样板间存在间隙,布局算法不要求区域水密填充,但对样板的形变存在限制,一般只允许刚性形变。目前已有许多方法来计算布局 and 填充,基于样板的添加、删除和位移等变换,例如艺术填充^[1]、马赛克装饰^[2]或地图纹理填充^[3]等。如果目标区域大,布局算法的难点在于不同元素间的限制,如家具布局方案^[4]、书架填充^[5]

等应用。这类问题大多数可以通过如模拟退火法和 rjMCMC 等算法解决^[6]。如果目标填充允许有形变,算法的应用主要包括允许轻微形变的 jigsaw 图像马赛克^[7]。第 2 类填充问题不允许样板间存在间隙,要求水密覆盖。若也不允许填充样板形变,通常要求边界较为简单规整,能将其分割为规整的砖块。这类问题通常存在强制砖块邻接关系限制,有效应用于纹理合成和蓝噪声生成等,如 Wang Tiles 问题^[8-10]、俄罗斯方块图案填充问题^[11]、多联骨牌拼接^[12]等。文献[13]提出采用不同尺寸的长方形填充目标区域,如建筑布局,算法的难点不在于填充整个区域,而是考

基金项目:国家重点实验室创新基金(ZZKT2013A12);江苏省科技支撑计划项目(BE2011058, BY2012190)。

作者简介:徐绕山(1972—),男,副教授、硕士,主研方向为分布式计算、计算机多媒体技术;袁苇航,硕士研究生;孙正兴,教授、博士生导师、CCF 会员。

收稿日期:2016-03-31 **修回日期:**2016-05-24 **E-mail:**xurs@njcit.cn

虑邻接关系的限制。文献[14-15]提出了分层分割和回溯的方法,适用于区域边界为复杂图形且填充样板可大幅度形变的应用,如城市布局设计。在此类填充问题中,若允许填充样板有缩放、切变、旋转等多步骤形变^[16],通常采用的自顶向下细分法不能有效控制目标区域划分形状^[17],而贪心法一般不能填满目标区域,因而,也很难找到单一的有效方案。

本文针对在样板形状、拼接、旋转和边界优先等限制条件下的可形变填充问题,提出一种基于四边形网格剖分的可计算填充方法。该方法考虑在约束条件下的分步计算,主要包含2步:首先将目标区域和样板基于四边形网格剖分,计算给定样板在拼接、旋转、边界和最小形变等约束条件下的整型规划,以决定样板的近似放置位置;然后采用对布局结果进行样板的全局优化,使用迭代的方法改变样板的形状,以达到要求的填充效果。

1 基于四边形网格剖分的计算区域填充

1.1 目标区域与样板分割

目标区域是一个由分段曲线组成的封闭任意边数多边形。样板为一个在确定的允许变化范围内的基本多边形。区域计算填充的目标是用给定的样板覆盖此区域,覆盖在目标区域中的任意一个样板称为一个砖块,每个砖块的几何结构尽可能接近规定的样板。本文将问题划分为一个离散的拼接部分和一个连续优化部分。首先将目标区域和砖块样板分割为由四边形组成的网格,使用线性规划方法将连续的完全覆盖问题转化为离散的拼接问题。其次,对于离散拼接的结果,将目标区域中网格剖分产生的节点作为连续变量,对其位置进行优化来进一步改善样板的拼接效果,算法框架和流程如图1所示。本文采用四边形网格作为离散化的网格,主要是基于选择的目标应用,如城市规划布局、停车场设计、电子相册等。由于填充外框多为四边形,因此在四边形网格中进行填充可以最小化布局之间的重叠与缝隙,并且使样板的形变较少。在四边形网格中,度为4的节点称为规则节点,否则为不规则节点。对于给定的一系列由基本多边形构成的砖块样板,需要将目标区域进行四边形剖分,并且要求剖分后网格的粒度和不同方向的长度比例都与基本多边形匹配。

目标区域为一个由多笔完成任意闭合的图形,如图2(a)所示。然后对该区域按文献[17]方法进行四边形剖分处理,生成如图2(b)所示的结果。为了便于计算,剖分后的网格信息存储在2个Vector容器中,如图2(c)所示。第1个用来存储网格中所有节点的信息,包括其坐标、邻接的节点和邻接的面的序号,以及是否为边界等特征。第2个用来存储网格中所有面的信息,包括其邻接的面和四角上的节点序号。

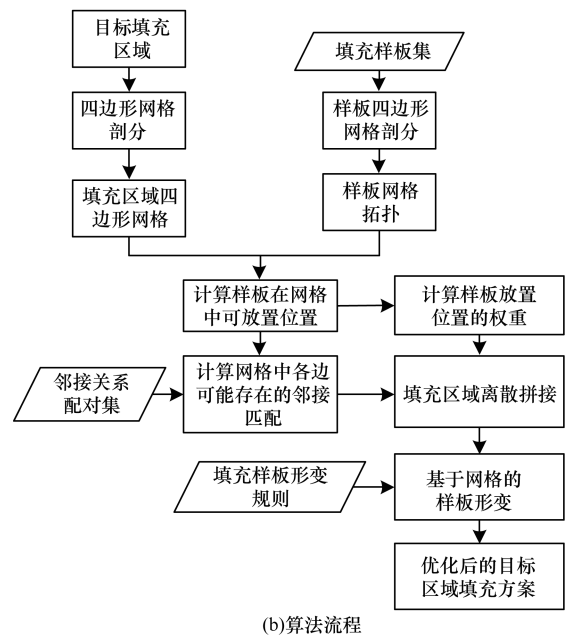
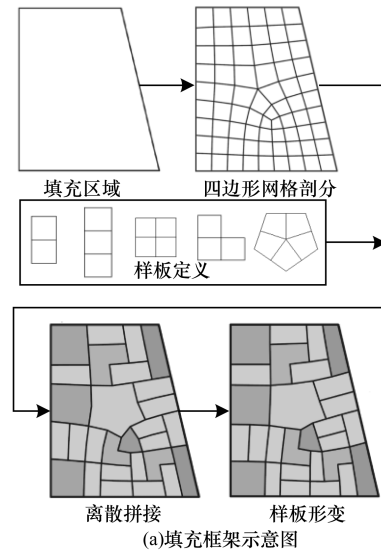


图1 基于四边形网格剖分的可计算区域填充算法流程

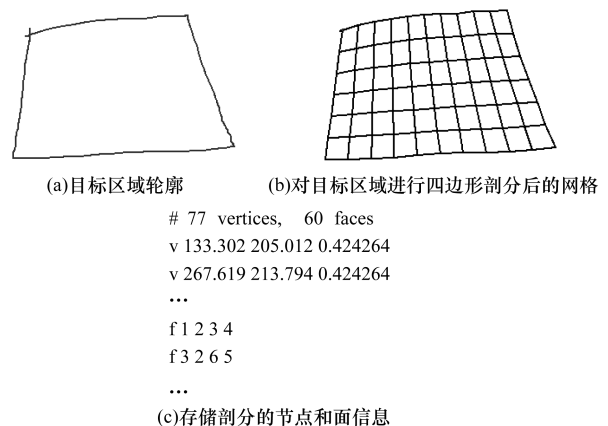


图2 对目标区域进行四边形剖分的结果

一个用于目标区域填充的砖块样板 $\tau_x, 0 \leq x < N$, 其中 N 是样板数量, 由一个拓扑结构包含连通途径的基本多边形 B_x 及其可形变规则组成。和目标

区域一样,砖块样板的基本多边形也剖分为四边形网格,从而可以进行离散化拼接。离散拼接的任务是在目标区域的网格中搜索与 τ_x 同形的网格图形。为了简化起见,假设样板的基本多边形内部最多只有一个不规则节点,其度不为 4。一个砖块样板的基本多边形是一个有着连通路经拓扑结构的四边形网格。每一个样板包含一个锚点和一个起始方向,锚点为遍历该样板网格中所有节点路径的起始点,起始方向为从锚点到下一个节点的方向。

在实现中,一个基本多边形由其节点遍历路径表示,如图 3 所示,预定义样板信息为 2 个数组,其中第 1 个数组为路径中每一个节点所连接的边数,即基本多边形的边界循环。第 2 个数组为路径中每一个节点到下一个节点的方向,其中:0 为 $x-$, 1 为 $y-$, 2 为 $x+$, 3 为 $y+$, 节点后面的信息为样板网格中每个节点的坐标。

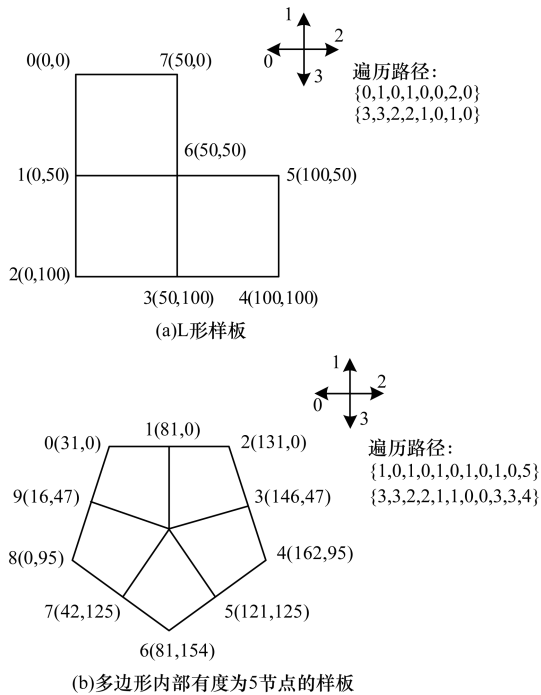


图 3 样板的拓扑结构示例

考虑到路径中包含了 4 个方向,而待填充图形的四边形网格中可能出现节点度不为 4 的情况,所以将样板分为规则和不规则 2 种,其中不规则样板为包含了度不为 4 的节点的样板,且每个样板最多含有一个度不为 4 的节点,用不规则样板填充区域网格中可能出现的对应度的节点。图 3(b)所示为包含了度为 5 节点的样板及其存储的拓扑结构,其中第 1 个数组中若出现不等于 0,1,2,4 的元素说明该样板为不规则的。

1.2 计算区域填充

1.2.1 离散拼接

将目标区域剖分后产生的网格称为 M ,使用砖块 $T_{i,x}$ 对 M 进行离散拼接。其中:砖块 $T_{i,x}$ 是 M 上一系

列连接封闭的网格的序列,并且有和 B_x (砖块样板 τ_x 的基本多边形) 的边界循环一样的闭合路径。 $T_{i,x}$ 从由锚点 v_i 和起始方向确定的半边 e_i 起始。在 M 上的一个离散拼接即为在没有砖块重叠的情况下用砖块覆盖 M 的网格。如果 M 的一个拼接方案对 M 网格未覆盖面最少,则为最优方案。当所有网格都被覆盖时,则是理想状态的完全拼接。离散拼接时先通过枚举网格 M 中所有有效的样板、锚点和起始方向的组合产生所有样板可能的位置。其中,带有不规则节点的样板位置只能在网格中相应度不为 4 的节点上。对于每个可放置位置 i 上的砖块 $T_{i,x}$,产生一个相同变量的布尔型变量,表明在此拼接方案中该砖块是否存在。为避免重叠,限制为对于 M 中的每一个面 f_k ,有 $\sum_{f_k \in T_{i,x}} T_{i,x} \leq 1$ 。如果该值等于 1,则表示是完全拼接。规划的要求最优解的目标函数建模为 $\sum_{i,x} W_{i,x} T_{i,x}$,其中 $W_{i,x}$ 是 $T_{i,x}$ 对应砖块的权重,初始设定为该样板所包含的面个数。在算法实现中,遍历每个样板,对于每个样板遍历待填充图形网格 M 中的所有节点,判断其能否作为一个该样板锚点,并进行 4 个方向的旋转,分别作为起始方向,判断的依据为 M 中从该点出发沿着样板的节点路径能否遍历该样板的所有节点。对于每个可以作为锚点的情况,生成一个填充变量。每个变量存储样板的编号、锚点序号、起始方向、该变量的初始权重,以及该位置样板填充所覆盖的所有面的编号。对 M 中所有可能的砖块位置枚举结束后,对拼接问题进行线性规划计算,计算的目的是使所有变量与其权重乘积的和最大,即:

$$\text{maximize } \sum_{i,x} W_{i,x} T_{i,x} \tag{1}$$

其中,对于 M 中的每一个面 f_k ,有 $\sum_{f_k \in T_{i,x}} T_{i,x} \leq 1$ 。

在这个过程中,每一个变量 $T_{i,x}$ 的取值为 $\{0,1\}$ 。本文使用线性规划问题的专用求解工具 Gurobi 框架,求得对图 2 区域离散拼接问题的最优解。如表 1 所示,表中每一行表示一个砖块变量,其信息包括其锚点位置、面片序号及其权重等。

表 1 对图 2 目标区域线性规划后的最优解示例

变量序号	样板序号	面片序号	锚点序号	权重	是否在边界
1	0	2,1	6	1	1
2	0	8,9	9	1	0
3	0	4,3	10	1	1
...
23	3	56,55,49	73	1.5	1
24	3	59,58,52	76	1.5	1

用砖块 $T_{i,x}$ 值为 1 的变量所指向的样板在变量节点的位置以变量方向填充图 2 中的网格,生成拼接结果如图 4 所示,其中不同变量用不同颜色表示。

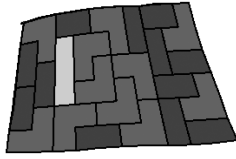


图4 对拼接区域用给定样板进行拼接后的效果示例

1.2.2 权重计算

为了满足不同应用场景和填充计算的限制,设计每个填充变量的权重组合公式如下:

$$W_x \times factor_0(T_{i,x}) \times factor_1(T_{i,x}) \quad (2)$$

其中, W_x 表示砖块样板 τ_x 的权, 默认等于 B_x 所含的面数, 对 W_x 可以进行调整使其满足各种不同的应用对砖块样板的拼接限制。公式中的 $factor_x()$ 是对于同一个砖块样板的不同类型的权重函数, 作为 W_x 的系数来适应应用场景的不同需求。例如可以设置为一个从 0~1 之间的随机值, 进行样板的随机拼接。也可设置一个从基本多边形 B_x 到砖块 $T_{i,x}$ 形变幅度的形变因子, 对于形变幅度小的变量权重较大, 优先进行拼接。此外, 假设要限制某一个砖块样板在拼接中出现的次数, 可以在线性规划的函数中设定此砖块出现次数的上下边界:

$$\alpha \leq \sum_i T_{i,k} \leq \beta \quad (3)$$

其中, α 和 β 是样板 τ_k 在网格中出现次数的下界和上界。

1.2.3 样板填充

在对目标区域进行离散拼接后生成的结果中, 一个图块代表一个填充方案中未经形变的样板变量, 可用不同的颜色表示不同的样板, 如图 5(a) 所示。此结构只能表达目标区域中不同位置的填充方案, 还不能表达用给定样板对目标领域拼接后的效果。需要用未形变的样板对给定区域进行实际拼接, 以直观地显示样板在未形变前直接填充的空隙和覆盖情况, 如图 5(b) 所示, 可用来对填充方案的选择和计算形变前后的效果。

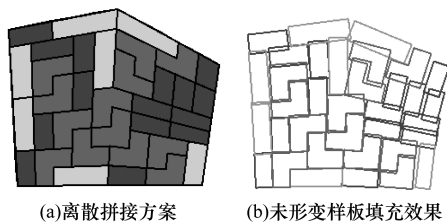


图5 目标区域离散拼接及样本填充示意图

要把给定样板放置在目标区域网格中的给定位置, 需要 3 个参数对样板进行约束, 分别为: 形心坐标 c , 缩放比例 k 和旋转角度 ω 。

首先, 每个样板 T_i 都要先求得形心坐标 c_i (样板坐标系下的相对坐标), c_i 的 x 和 y 坐标分别为:

$$\begin{aligned} c_i \cdot x &= \sum_{k=1}^n v_{i,k} \cdot x/n \\ c_i \cdot y &= \sum_{k=1}^n v_{i,k} \cdot y/n \end{aligned} \quad (4)$$

对于样板中的每个节点 $V_{i,k}$ ($0 < k < n$), n 为样板 T_i 的节点总数, 由式(5)计算旋转角度 $\omega_{i,k}$, 即 $V_{i,k}$ 与形心所连直线在坐标系中的角度, 其中 $0 \leq \omega_{i,k} \leq 2\pi$ 。

$$\omega_{i,k} = \arctan((v_{i,k} \cdot y - c_i \cdot y)/(v_{i,k} \cdot x - c_i \cdot x)) \quad (5)$$

其次, 对于每个样板变量 $T_{i,x}$, 通过归一化方法求得变量与样板的缩放比 k , 根据形心坐标 $c_{i,x}$, 对于样板变量中的每个节点 $V_{i,x,k}$ ($0 < k < n$), n 为样板 T_i 的节点总数, 计算它与形心所连直线在坐标系中的角度 $\omega_{i,x,k}$ 。求得每个样板变量中每个节点与形心的角度后, 即可求该变量的旋转角度, 公式为:

$$\omega_{i,x} = \sum_{k=1}^n (\omega_{i,x,k} - \omega_{i,k})/n \quad (6)$$

计算出每个样板变量的形心坐标 c 、缩放比例 k 和旋转角度 ω 这 3 个参数后, 计算样板变量和样板的形心之间的偏移, 将样板的所有点和边按照此偏移放置在目标区域中。按照缩放比对样板进行缩放, 按照旋转角度对样板进行旋转。对所有填充方案中的样板变量进行计算, 生成在样板未形变下对给定区域进行实际拼接效果。

1.2.4 样板拼接限制

在样板拼接的过程中, 使用样板边之间的颜色匹配来限制砖块之间相互的连接关系。设置样板的基础多边形的每条半边一个颜色, 拼接时要求网格 M 中每一对相对的半边颜色相同。首先定义一个接块元素 J , 对于网格 M 中的每一个非边界边 E_i , 存在有 k 个接块 $J_{i,j}$, 其中: $0 \leq j < k$, j 是接块的颜色序号, k 是颜色总数。规定 $J_{i,j}$ 出现在拼接方案中 2 个邻接 E_i 的样板变量的颜色相互匹配。将每个颜色的邻接边与和接块名称相同的布尔变量加入到线性规划中, 并受限于当一个样板变量与邻接的接块颜色不匹配时, 样板变量与接块出现的和小于或等于 1, 离散拼接的目标函数为:

$$\text{maximize } \sum_{i,x} W_{i,x} T_{i,x} + \sum_{i,j} W_j J_{i,j} \quad (7)$$

其中, $J_{i,j} + T_{i,x} \leq 1$; $\sum_{j=0}^k J_{i,j} \leq 1$; W_j 是边接块的权重, 线性规划的结果一定程度上由 W_j 决定, 优化了拼接方案中出现的边接块的数量, 它与颜色不匹配的边数目大致成反比。

如图 6 所示, 若需要的拼接纹理如图 6(a) 所示, 在邻接关系中, 正方形块由 4 个 1×3 的长方形块包围, 长方形块外围也邻接长方形块, 要求两 2 种块相互错落邻接。根据样板的邻接约束, 设置相应 2 种样板的外边颜色。其中, 2×2 网格组成的正方形样板外边颜色设为红色, 1×3 网格组成的长方形样板颜色设为绿色和黄色, 颜色为黑色的边代表未设置外边颜色, 如图 6(b) 所示。对网格中每条内边设置 2 种接块: 红色-绿色, 黄色-黄色, 这代表填充方案中当红色的边与绿色边邻接、黄色边与黄色边邻接时优先级更高。将这种接块变量和对应的约束不等式加入到整型线性规划中, 也就是对网格中每条内边添加接块变

量 <红色,绿色> <黄色,黄色> <绿色,红色>后,再进行最优解求解。若邻接纹理如图 6(c)所示,可使 1×2 的长方形块和 1×3 的长方形块的长短相邻边配 <棕色,棕色> <绿色,绿色> <红色,黄色> <黄色,红色>。对于图 6(e)所示的网格,生成最优填充方案如图 6(f)、图 6(h)所示,用样板填充区域效果如图 6(g)、图 6(i)所示。

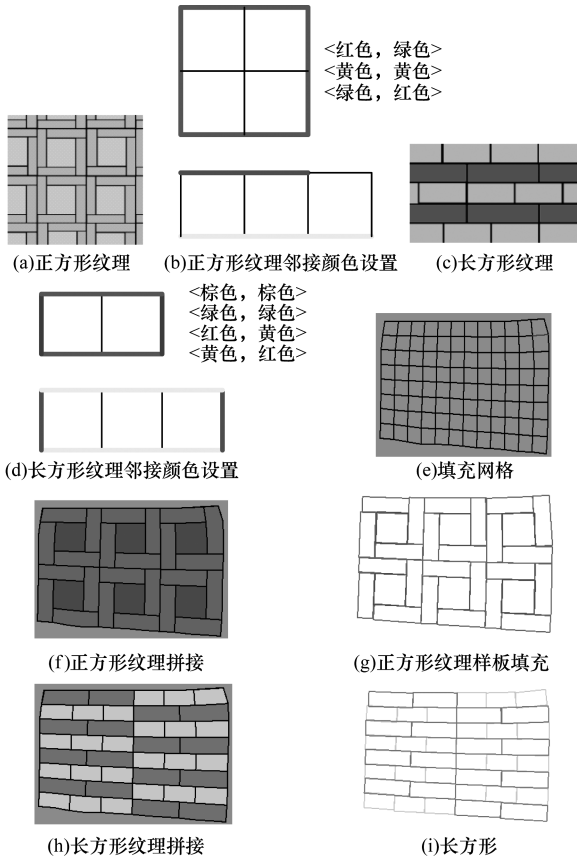


图 6 通过颜色匹配实现样板拼接限制

除了相邻的样板变量之间的限制以外,本文的填充方法中还对拼接方案做了其他 3 种限制,分别是基于目标区域边界的限制、对样板旋转的限制和最小形变优先的限制。

1) 区域边界优先限制

由于在实际的拼接方案中,通常需要根据区域中的不同位置选择相应的样板图案,因此可以限制特定样板出现在边界或是非边界。在四边形网格 M 中存储的数据结构包括网格的面和节点。可以对节点 x 添加布尔类型属性 $B_x \in \{0,1\}$,当节点 x 为边界节点时 $B_x = 1$ 。对于每个样板变量,在遍历其所有节点位置时判断是否有节点的 B_x 属性值为 1,若有,则将该变量标记为边界变量。在对变量计算权重时,添加权重因子:

$$factor(T_{i,x}) = \bigcup_{k \in T} B_k \times W_{i,B} + \bigcup B_k \quad (8)$$

其中, $W_{i,B}$ 为预设的该样板在边界情况下的权重系数。

2) 样板旋转限制

在目标区域填充过程中,可能需要对填充样板

方向的限制,而此拼接算法中允许样板基于四边形网格进行 4 个方向的旋转。对样板添加布尔类型属性标识其是否允许旋转,若不允许其旋转,则在线性规划中对所有节点位置进行样板变量生成时,一个锚点只生成原始方向的样板变量,再进行线性规划。如图 7 所示,图 7(a)是未对目标区域的拼接方案添加旋转限制的情况,不同样板随机分布。图 7(b)则是限制网格边界优先用 L 形样板拼接,非边界优先用 1×2 的长方形样板拼接,并且禁止该样板进行旋转而生成的拼接方案。

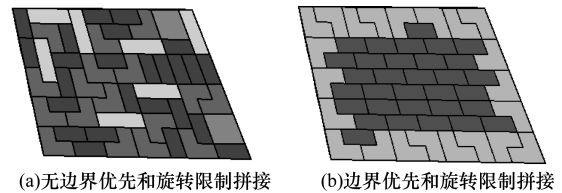


图 7 边界优先和旋转限制拼接方案示例

3) 最小形变优先限制

在未考虑样板形变的前提下,直接将样板按照线性规划的结果填入对应变量的位置,生成的拼接方案一般不是水密的。为了减少将样板填入网格 M 中所产生的缝隙和重叠面积,可以设定限制,对于每个拼接位置,优先拼接样板形状与边界网络形状差异最小的。要计算样板形状与网格中样板变量形状的差异,首先要将网格中的样板变量进行归一化处理。归一化方法是求出样板变量 $T_{i,x}$ 中节点遍历路径上所有边的平均长度 $L_{i,x}$,以及样板的节点遍历路径上所有边的平均长度 L_i ,再将两者相除,求得该变量的缩放比 $k = L_{i,x}/L_i$ 。对样板变量的所有边界 $l_{i,x}$ 除以缩放比,其中 i 为边的序号,求得边界边的归一化长度 $lk_{i,x} = l_{i,x}/k$ 。求得样板变量中所有边界边的归一化长度后,计算其与样板中对应边长度的方差,公式为:

$$S_{i,x} = \sqrt{\sum_{i=1}^n (lk_{i,x} - l_i)^2 / n} \quad (9)$$

此计算结果当变量 $T_{i,x}$ 的方差越大,说明形变越大,因此给目标函数中权重 $W_{i,x}$ 赋以越小的数值。

1.3 填充形变计算

通常对于给定的目标区域和样板形状,不允许样板形变的水密填充是不可能的。本文首先登记该变量的样板要填入该变量位置而进行形变后的形状,计算每个样板变量的形变差异,从而在离散拼接时带上权重,计算出形状误差最少的拼接方案。然后对离散拼接得到的方案进一步优化网格 M 的节点位置,使得每一个变量在全球或局部范围内与对应样板在给定形变下的形状更加一致,类似于基于投影的算法^[1,8]。形变通常由多重步骤组成,登记形变时,每一个形变步骤的大小都可以限制在一定范围内,例如自由平移的距离、旋转的角度以及缩放和切变的因子等。因为所有的形变步骤都基于相对坐

标系统,如中心和方向,本文迭代登记形变步骤的序列,每次形变的输入多边形都是上次形变的输出结果,直到结果收敛或达到时间阈值。因为每一次形变都保证减小错误或者维持错误值不变,故形变是收敛的。

砖块样板的形变由一系列变化步骤应用于指定的样板节点实现,如平移、切变、旋转、缩放等,样板内部节点的位置与形变无关。形变步骤可以根据要求只影响到样板的一部分节点,因而可产生如弯曲等非线性形变。在迭代形变时,每个下一步的变化是基于当前位置的。形变计算时对于一个网格 M 上的拼接方案,给每一个拼接的样板变量登记基本多边形在预定形变规则下朝着样板变量的形变,此形变保证多边形的面片与网格中对应节点的距离和之差最小。将样板变量在拼接中登记的基本多边形中的第 k 个节点(从锚点开始)的位置记为 $V_{i,x,k}$,称 $V_{i,x,k}$ 为网 $V_{i,x}$ 格 M 中变量 $T_{i,x}$ 中第 k 个节点的登记位置。网格 M 上的每一个节点 $V_n (0 \leq n < N, \text{其中 } N \text{ 是 } M \text{ 上的节点总数})$ 都可以对应到多个登记位置,而每一个登记位置的相邻样板变量中 V_n 都是一个边界节点,而这些登记位置可能都不同。为了增强优化的健壮性和简易性,采用带权的平均值方案,按如下公式计算:

$$\text{minimize } \sum_{n,i,x} W_{i,x} (v_n - R_{n,i,x})^2 \quad (10)$$

其中, $W_{i,x}$ 是变量 $T_{i,x}$ 的权重; $R_{n,i,x}$ 是 $T_{i,x}$ 中节点 V_n 的登记位置。由于一个样板变量最多只决定一个节点位置,因此带权的样板变量对于表示变量在形状优化中的不同影响程度十分有用。在 M 中的节点位置根据计算进行更新后,再次对所有的变量进行一次形状登记,然后更新节点的登记位置,重复这个过程直到所有拼接变量的形状登记的错误总量收敛或达到局部最小值。

在填充样板形变计算过程中,为了使边界点也可以进行移动,但又不降低网格边界保真度的情况下,添加一个额外的限制来保护网格的边界。对于每个网格边界节点 $V_n (0 \leq n < B, \text{其中 } B \text{ 是 } M \text{ 上的边界网格节点个数})$ 和 2 个相邻的边界节点 V_{n_0} 和 V_{n_1} 。如果 V_n, V_{n_0} 和 V_{n_1} 在一定的阈值内是共线的,形变时将 V_n 限制在由 V_{n_0} 和 V_{n_1} 的连线上,使三点共线,否则 V_n 保持在当前位置。因此对于 M 中的每个节点 V_n 及其相邻的每 3 个一组的节点,用一个二次项 $W_s (v_n - (v_{n_0} + v_{n_1})/2)^2$ 来测量 V_n 到 V_{n_0} 和 V_{n_1} 的平均偏差,其中 W_s 是限制的权重,把这个二次项加入到权重组式(10)中。

2 实验与分析

2.1 实验设计

本文算法的输入为给定的二维图形轮廓,实验时为了验证该算法的适用性,应考虑不同类型的二维图形

轮廓。给定的输入目标区域有三角形、五边形和不规则 3 种典型的区域。给定的填充样板如图 8 所示。

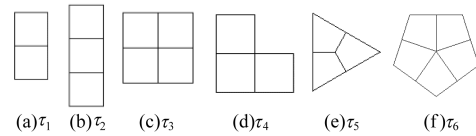


图 8 实验所用到的砖块样板

由于本文算法用给定样板对二维图形轮廓进行填充时,可以对不同的样板和不同的位置赋予不同的权重,从而使填充方案可以根据用户需求进行调整。因此,分别对实验数据集进行以下限定条件下的填充:1)不设置约束,默认每个样板的权重为网格所包含的四边形个数;2)边界优先使用 τ_1 ;3)非边界优先使用 τ_4 ,并禁止其旋转;4)边界优先使用 τ_4 并禁止其旋转,非边界优先使用 τ_3 。由于 τ_5 和 τ_6 样板中存在度不为 4 的节点,该 2 个样板对非规则样板,它们只能用于填充目标区域网格中存在度不为 4 的节点位置,因此不赋予约束权重。

2.2 评价指标

2.2.1 有效覆盖率

在对目标区域进行填充后,计算区域内部被样板砖块单次覆盖的面积与区域面积的比值,即:

$$\frac{S_B - \sum s_{\text{blank}} - \sum s_{\text{multi_cover}}}{S_B} \quad (11)$$

其中, S_B 为输入的目标区域轮廓面积; s_{blank} 为目标区域轮廓中未被填充的区域块面积; $s_{\text{multi_cover}}$ 为目标区域轮廓中多个样板砖块出现覆盖的区域块面积。该指标可以通过度量对目标区域填充后出现的缝隙与多个样板砖块出现重叠的面积与目标区域总面积的关系,从而判断该区域填充算法的优劣。

2.2.2 边界拟合度

在对目标区域进行填充后,计算样板砖块中所有邻接目标区域轮廓边上的所有节点与目标区域轮廓的最小欧式距离之和,再除以样板砖块中与目标区域轮廓邻接的点的个数,即:

$$\frac{\sum_{i=1}^n \min \|v_i, v_{\text{outline}}\|}{\sum_{i=1}^n v_i} \quad (12)$$

其中, v_i 为样板砖块中与目标区域边界邻接的边上的点; v_{outline} 为目标区域轮廓上的点; $\|v_i, v_{\text{outline}}\|$ 为点 v_i 与点 v_{outline} 的欧式距离。通过测量目标区域轮廓与边界砖块上点之间最短距离的平均值,从而度量对目标区域进行填充后,样板砖块中所有位于区域边界的边与原二维区域轮廓之间的平均单位形变量。该值越低,说明填充后的边界拟合度越好。

2.2.3 填充所耗时间

由于该算法基于线性规划,因此算法的执行时

间随着样板砖块变量的个数增加而增加。记录对不同形状的目标区域进行剖分产生的面个数以及进行填充所进行的时间,再分析随着区域网格中面的变化该算法执行之间的变化,可以预测该算法的时间复杂度。

2.3 实验结果

以目标区域是三角形、五边形和不规则轮廓为例,按拼接时的不同限制条件约束下,形成如图 9 所示的拼接方案和样板填充结果。其中,图 9(a)为填充区域及四边形网格剖分;图 9(b)为不设置约束的拼接方案和样板填充;图 9(c)为约束 1:边界优先使用 τ_1 ;图 9(d)为约束 2:非边界优先使用 τ_4 ,并禁止其旋转;图 9(e)为约束 3:边界优先使用 τ_4 并禁止其旋转,非边界优先使用 τ_3 。对于不同目标区域有效覆盖率、边界拟合度等区域填充评价指标实验结果在表 2 中给出。

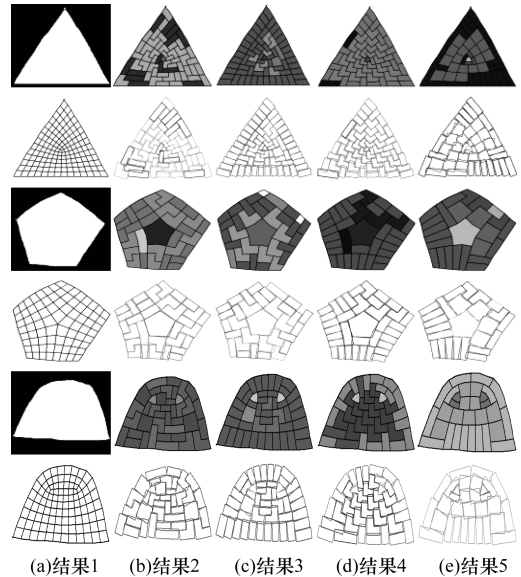


图 9 实验区域在不同约束下的拼接方案和样板填充结果

表 2 三角形、五边形和不规则区域填充实验数据

目标区域	约束限制	区域网格的面数	有效覆盖率	边界拟合度(像素点)	执行时间/ms
三角形	无约束	147	0.951 713	4.759 159	1 362
	约束 1	147	0.951 695	3.439 547	1 325
	约束 2	147	0.934 621	3.874 621	2 592
	约束 3	147	0.940 042	4.872 227	1 825
五边形	无约束	80	0.945 856	2.820 362	612
	约束 1	80	0.930 809	2.754 664	379
	约束 2	80	0.950 580	2.525 362	495
	约束 3	80	0.945 112	2.842 162	811
带有弧线的 不规则形状	无约束	102	0.919 102	2.030 630	1 006
	约束 1	102	0.930 061	2.061 999	1 651
	约束 2	102	0.917 271	2.062 615	747
	约束 3	102	0.912 872	2.149 276	1 029

从表 2 的实验结果数据可以看出,对于实验数据集中不同的目标区域和约束条件,该方法的有效覆盖率基本上保持在 90% 以上,而每个拼接方案中砖块边界像素点距离轮廓的平均最短距离保持在 5 个像素点以内。该方法对目标区域的有效覆盖率和边缘拟合度与约束限制关系不大,显示方法的适应性较强。另外可以看出,随着网格面数增加,程序的执行时间基本上呈线性增长。

3 结束语

为了更好地实现在一定几何约束下的可形变水密填充,本文采用具有良好适用性的四边形网格剖分方法对填充区域和砖块样板进行分割,以线性规划的离散拼接实现区域填充计算,再通过控制样板的形变,最终达到较好的填充效果。在计算区域填充时可以设置不同的限制条件,对填充结果具有较好的可控性,适用于某些特定需求的应用场合。由

于对二维轮廓进行四边形网格剖分的算法是在三维空间中计算,然后映射到二维空间,因此当目标区域轮廓为凹多边形时网格会出现重叠的情况,从而使剖分产生非四边形面,填充算法会出错。在后续工作中,将针对这个问题进一步研究,考虑将凹多边形区域划分为多个凸多边形再进行剖分和填充。

参考文献

- [1] Reinert B, Ritschel T, Seidel H P. Interactive By-example Design of Artistic Packing Layouts [J]. ACM Transactions on Graphics, 2013, 32(6): 1-7.
- [2] Hausner A. Simulating Decorative Mosaics [C] // Proceedings of the 28th Annual Conference on Computer Graphics & Interactive Techniques. New York, USA: ACM Press, 2001: 573-580.
- [3] Levy B, Petitjean S, Ray N, et al. Least Squares Conformal Maps for Automatic Texture Atlas Generation [J]. ACM Transactions on Graphics, 2002, 21(3): 362-371.

(下转第 312 页)

4 结束语

本文对单一制造商和单一买方组成的 IPP 库存系统模型进行研究,提出基于联合成本的两级供应链三角模糊需求随机过程模型,并通过参数敏感性实验验证了该模型的有效性。但目前还存在算法复杂度及研究对象较为单一的问题,因此,下一步将对模糊随机过程模型进行扩展,研究多级供应链 IPP 库存系统的模糊随机过程模型。

参考文献

- [1] 苏生,于海杰,吴正华. 供应链协商调度模型与算法[J]. 软件学报,2013,24(1):12-24.
- [2] 毕功兵,瞿安民. 不公平厌恶下供应链的批发价格契约与协调[J]. 系统工程理论与实践,2013,33(1):134-140.
- [3] 林云,田帅辉. 物流云服务——面向供应链的物流服务新模式[J]. 计算机应用研究,2012,29(1):224-228.
- [4] Pang Bohui, Bai Shizhen. An Integrated Fuzzy Synthetic Evaluation Approach for Supplier Selection Based on Analytic Network Process [J]. Journal of Intelligent Manufacturing, 2013, 24(1): 163-174.
- [5] Yu Ying, Wang Zheng, Liang Lan. A Vendor Managed Inventory Supply Chain with Deteriorating Raw Materials and Products [J]. International Journal of Production Economics, 2012, 136(2): 266-274.
- [6] Kubat C, Yuce B. A Hybrid Intelligent Approach for Supply Chain Management System [J]. Journal of Intelligent Manufacturing, 2012, 21(4): 1-8.
- [7] 卢志刚,林卡. 基于声誉的供应链合作伙伴选择模型[J]. 计算机工程, 2015, 41(6): 152-157.
- [8] Yang Guoqing, Liu Yankui. Designing Fuzzy Supply Chain Network Problem by Mean-risk Optimization Method [J]. Journal of Intelligent Manufacturing, 2015, 26(3): 447-458.
- [9] Bandyopadhyay S, Bhattacharya R. Applying Modified NSGA-II for Bi-objective Supply Chain Problem [J]. Journal of Intelligent Manufacturing, 2013, 24(4): 707-716.
- [10] Kannan D, Jafarian A, Khamene H A. Competitive Performance Improvement by Operational Budget Allocation Using ANFIS and Fuzzy Quality Function Deployment: A Case Study [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2013, 68(4): 849-862.
- [11] Hashemian S M, Behzadian M, Samizadeh R. A Fuzzy Hybrid Group Decision Support System Approach for the Supplier Evaluation Process [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2014, 73(8): 1105-1117.
- [12] Dey O, Chakraborty D. A Fuzzy Random Continuous Review Inventory System [J]. International Journal of Production Economics, 2011, 132(1): 101-106.
- [13] 冯玮,郭永清,罗飞. 基于联邦 MAS 的 Petri 网供应链需求预测模型[J]. 计算机工程, 2015, 41(9): 298-302.
- [14] Kumar R S, Goswami A. EPQ Model with Learning Consideration, Imperfect Production and Partial Backlogging in Fuzzy Random Environment [J]. International Journal of Systems Science, 2015, 46(8): 159-168.
- [15] Wang Xing. Continuous Review Inventory Model with Variable Lead Time in a Fuzzy Random Environment [J]. Expert Systems with Applications, 2011, 38(3): 11715-11721.
- [4] Merrell P, Schkufza E, Li Zeyang, et al. Interactive Furniture Layout Using Interior Design Guidelines [J]. ACM Transactions on Graphics, 2011, 30(4): 76-79.
- [5] Majerowicz L, Shamir A, Sheffer A, et al. Filling Your Shelves: Synthesizing Diverse Style-preserving Artifact Arrangements [J]. IEEE Transactions on Visualization & Computer Graphics, 2014, 20(11): 1507-1518.
- [6] Yeh Y T, Breeden K, Yang Lingfeng, et al. Synthesis of Tiled Patterns Using Factor Graphs [J]. ACM Transactions on Graphics, 2013, 32(1): 60-72.
- [7] Kim J, Pellacini F. Jigsaw Image Mosaics [J]. ACM Transactions on Graphics, 2002, 21(3): 657-664.
- [8] Cohen M F, Shade J, Hiller S, et al. Wang Tiles for Image and Texture Generation [J]. ACM Transactions on Graphics, 2003, 22(3): 287-294.
- [9] 韩建伟,王青,周昆,等. 基于 Wang Tiles 的几何纹理合成[J]. 软件学报, 2009, 20(12): 3254-3264.
- [10] Kopf J, Cohen-Or D, Deussen O, et al. Recursive Wang Tiles for Real-time Blue Noise [J]. ACM Transactions on Graphics, 2006, 25(3): 509-518.
- [11] Fasano G. A MIP Approach for Some Practical Packing Problems: Balancing Constraints and Tetris-like Items [J]. Quarterly Journal of the Belgian French & Italian Operations Research Societies, 2004, 2(2): 161-174.
- [12] Karademir S, Prokopyev O A, Mailloux R J. Irregular Polyomino Tiling via Integer Programming with Application in Phased Array Antenna Design [J]. Journal of Global Optimization, 2015(9): 1-37.
- [13] Merrell P, Schkufza E, Koltun V. Computer-generated Residential Building Layouts [J]. ACM Transactions on Graphics, 2010, 29(6): 81-95.
- [14] Yang Yongliang, Wang Jun, Vouga E, et al. Urban Pattern: Layout Design by Hierarchical Domain Splitting [J]. ACM Transactions on Graphics, 2013, 32(6): 2504-2507.
- [15] Vanegas C A, Kelly T, Weber B, et al. Procedural Generation of Parcels in Urban Modeling [J]. Computer Graphics Forum, 2012, 31(2): 681-690.
- [16] Peng C H, Yang Yong-liang, Wonka P. Computing Layouts with Deformable Templates [J]. ACM Transactions on Graphics, 2014, 33(4): 70-79.
- [17] Marcias G, Takayama K, Pietroni N, et al. Data-driven Interactive Quadrangulation [J]. ACM Transactions on Graphics, 2015, 34(4): 1-10.
- [18] Bouaziz S, Deuss M, Schwartzburg Y, et al. Shape-up: Shaping Discrete Geometry with Projections [J]. Computer Graphics Forum, 2012, 31(5): 1657-1667.

编辑 金胡考

编辑 顾逸斐

(上接第 305 页)