

一种纺织文物图样数字化修复方法研究

蒋超¹, 汪家杰², 俞琳^{1,3}

(1. 西安工程大学 服装与艺术设计学院, 西安 710048; 2. 西安科技大学 艺术学院, 西安 710061; 3. 西北工业大学 现代设计与集成制造技术教育部重点实验室, 西安 710072)

摘要: 纺织文物的图样由于受到诸多因素的影响而遭到损坏, 文物图样的复原对考古和设计等行业具有极大的意义。文章对纺织文物图样形式和破损情况进行分类研究; 基于 Criminisi 算法进行改进, 提升了置信项和优先级计算的可靠性, 实现了规律型图样的数字化修复技术; 利用人机交互的形式, 通过人工补全缺失图样结构和稀疏表示模型, 实现了画作型图样的数字化修复技术; 并最终系统地提出了纺织文物图样数字化修复方法和修复流程。案例验证表明, 所提出的技术和方法可以较好地实现纺织文物图样的数字化修复, 并显著缩短了修复耗时, 提高了修复效率。

关键词: 纺织文物; 文物图样; 图样修复; 计算机辅助设计; 计算机图像处理

中图分类号: TS101.91; TP391.41 文献标志码: A 文章编号: 1001-7003(2019)11-0021-05 引用页码: 111104

Research on a digital restoration method for textile cultural relics

JIANG Chao¹, WANG Jiajie², YU Lin^{1,3}

(1. Apparel and Art Design College, Xi'an Polytechnic University, Xi'an 710048, China; 2. Art College, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710061, China; 3. Key Laboratory of Modern Design and Integrated Manufacturing Technology, Ministry of Education, Northwest Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: The pattern of textile relics has been damaged due to many factors, and the restoration of cultural relic patterns has great significance for the archeology and design industries. In this paper, the forms and damages of textile relics patterns were classified and investigated. By improving based on the Criminisi algorithm, the reliability of confidence items and priority calculation was promoted, and the digital restoration technology of regular patterns was realized. By manually replenishing the defective pattern structure with man-computer interaction and the sparse representation model, the digital repair technique for the painting pattern was implemented. Finally, the digital restoration method and repair process of textile cultural relics were systematically proposed. The case study shows that the proposed technology and method can better realize the digital repair of textile cultural relics, significantly shorten the repair time and improve the repair efficiency.

Key words: textile cultural relic; cultural relic pattern; pattern repair; computer aided design; computer image processing

中国古代纺织品的图样设计, 饱含了先民的设计智慧, 体现了上千年的文化传承, 具有极高的艺术水平和艺术价值, 能够为现今服装及相关领域的设

计工作提供重要的启发和借鉴^[1-2]。然而由于纺织品自身的特殊性, 纺织文物在出土前就受到腐烂、霉菌、虫蛀、褪色、污染、黏连等诸多因素的破坏^[3]。这些破坏因素使其图样设计效果也受到不同程度的损毁, 对纺织文物的理论研究和实际应用造成了阻碍。

图样数字化修复技术相比于传统的人工修复, 具有效率更高、成本更低、修复结果灵活性高、便于调整等优势, 是文物图样修复领域的研究热点和前沿。目前, 常用的图样数字化修复技术包括两大类:

收稿日期: 2019-02-26; 修回日期: 2019-10-09

基金项目: 陕西省社会科学基金年度项目(2019K036); 陕西省教育厅科研计划项目(16JK1484); 西安工程大学哲学社会科学研究项目(2019ZXSK05)

作者简介: 蒋超(1987—), 男, 讲师, 博士, 主要从事计算机辅助产品设计、计算机图形学等的研究。

基于几何学的修复方法和基于图像块的修复方法。基于几何学的修复技术主要用于线条和小区域的图样修复,包括曲率^[4]、各向异性扩散^[5]、全变分最小化^[6]等;而基于图像块的修复技术主要利用样例法^[7]、混合法^[8]、能量方程和稀疏表示模型^[9]对待修复的区域进行纹理合成。部分学者还对样例法中的置信因子项、优先权函数、搜索空间等算法进行改进,提出了一些新的改进算法。此外,BV-G 模型^[10]图像修复技术提出了一种多技术混合的修复思路,文献[11]还将在线字典学习用于大面积纹理缺失或边缘缺失的图像修复。

上述技术均使用邻近区域或其他已知区域对待修复区域进行修复,解决了部分纺织文物图样数字化修复的问题。而对于一些“画作型”图样(已知区域和待修复区域之间的关联性和相似性较弱),修复效果并不理想。因此,本文从纺织文物图样修复实践角度出发,将纺织文物的图样分为规律型、画作型、综合型三类,基于 Criminisi 算法和稀疏表示模型进行算法改进,并采用人机交互的方式,提出一种针对纺织文物图样的图样数字化修复方法。

1 规律型图样数字化修复算法实现

规律型图样的图样形式具有典型的重复或对称规律。此外,从微观角度来看,若图样待修复面积较小,则其局部重复性高,也可被视为规律型图样。传统的 Criminisi 算法在对破损区域的修复顺序的优先权进行多次计算后,置信项出现了迅速下滑的情况,使得优先权计算结果的可靠性降低,修补次序变得混乱。因此,基于 Criminisi 算法,对算法中破损区域的修优先权计算公式进行改进,并重新定义置信项。规律型图样数字化修复关键技术如下:

对于给定的图样 I_1, Φ_1 为已知图样区域, Ω_1 为破损图样区域, δ_{Ω_1} 为待修复区域与已知图样的交界线, p 点为计算得出的最高优先级边界点, Ψ_p 是以 p 点为中心的图样区域, n_p 是 δ_{Ω_1} 在点 p 处的单位法向量, $\nabla I_1 \frac{1}{p}$ 为 p 点的等照度矢量。

Step 1: 计算图样块修复优先级 $P(p)$ 。

$$P(p) = C(p) \times D(p) \quad (1)$$

设样本块中去除中心点后的已知像素数量为 H , 用 $|\Psi_p|$ 表示样本块的数量。在 Criminisi 算法的基础上,将已知像素点 q 与中心点 p 的距离加入置信度计

算^[7],以降低置信项滑坡速度。置信项 $C(p)$ 和数据项 $D(p)$ 的计算公式分别为:

$$\begin{cases} C(p) = \sum_1^H Dist(p, q) \\ Dist(p, q) = \max(|q_i - p_i|, |q_j - p_j|) \end{cases} \quad (2)$$

$$D(p) = \frac{\left| \nabla I_1 \frac{1}{p} \cdot n_p \right|}{\omega} \quad (3)$$

式中: ω 是归一化因子。

Step 2: 对样本图样块进行修复。

在已知区域中搜索最优已知样本块 Ψ_q , 并由 Ψ_q 填充 Ψ_p , 完成一次填充。若修复效果不佳,由于规律型图样具有良好的对称性或重复性,也可以通过人工选择确定若干个疑似最优区域,对疑似区域进行最优匹配计算,从而避免了大量无效运算,提高匹配效率。最优匹配样本块 Ψ_q 应满足:

$$\Psi_q = \operatorname{argmin}(Simi(\Psi_p, \Psi_q)) \quad (4)$$

式中: $Simi$ 函数为样本块相似度计算函数。

在 RGB 显示模式下,设样本块大小为 $m \times m$ 个像素, x 表示样本块 Ψ_p 的像素色彩值, y 表示样本块的 Ψ_q 像素色彩值。则两样本块的相似度值可表示为:

$$Simi(\Psi_p, \Psi_q) = \sqrt{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m (x_{ij} - y_{ij})^2} \quad (5)$$

Step 3: 图样块置信度更新。

在 Step 2 完成一次填充后,待修复像素变为已知像素,需对该像素的置信度进行重新计算。

Step 4: 重复 Step 1 ~ Step 3,直到待修复区域为空,结束。

2 画作型图样数字化修复算法实现

画作型图样由于其自身的规律性较弱,难以通过已知区域的信息对待修复区域进行逻辑推理和智能修复。因此,采用人机交互的方式,通过人工补全图样的结构信息,引导图样的结构修复,基于图样的连续性和稀疏表示模型对候选样本块进行线性组合,并最终实现画作型图样的修复。画作型图样数字化修复关键技术如下:

设给定的图样 I_2, Φ_2 为已知图样区域, Ω_2 为破损图样区域。对破损区域的图样进行结构补全,黑色线条为人工补全的结构线,红色线条 δ_{Ω_2} 为待修复区域与已知图样的交界线,算法符号示意如图 1 所示。

Step 1: 待修复图样块分类。

对待修复区域 Ψ_u 进行分类,判断其是否包含结

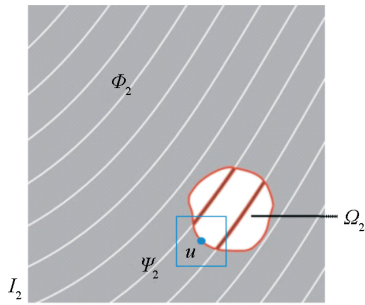


图 1 算法符号示意

Fig. 1 Symbolic diagram of the algorithms

构信息。若不包含,则属于纹理块集合 $T = \{\Psi_t\}_{t=1}^N$; 否则,属于结构块集合 $S = \{\Psi_s\}_{s=1}^M$ 。

Step 2: 如果 T 不是空集,采用随机抽取的方式,随机确定优先待修复的纹理块 Ψ_t ,并利用式(4)和(5)选定 K 个最优匹配已知样本块。

Step 3: 建立约束方程,利用 K 个最优匹配已知样本块的线性组合去填充块 Ψ_t 。

约束方程为:

$$\begin{cases} \sum_{w=1}^H a_{cw} = 1 \\ \|\bar{E}\hat{\Psi}_u - E\Psi_u\|_2^2 < \varepsilon \end{cases} \quad (6)$$

式中: 向量 $a_c = (a_{c1} a_{c2} \cdots a_{cw})$ 是 Ψ_u 的稀疏表示,即稀疏解,其作为权重值的加和为 1。 \bar{E} 和 E 分别为已知区域和待修复区域的逻辑矩阵, $\hat{\Psi}_u$ 为 Ψ_u 的线性估计, ε 为容忍度。

Step 4: 图样块置信度更新,重复 Step 2 ~ Step 4 进行填充,直到 T 为空。

Step 5: 当 T 为空集, S 不为空时,基于结构复杂度对 Ψ_s 的优先权 $P(s)$ 进行计算。

$$P(s) = C(s) \times \text{Comp}(s) \quad (7)$$

Comp 函数表示待修复样本块的结构复杂度,公式为:

$$\text{Comp}(s) = \frac{1}{2} \exp \left[-\frac{\sum_{s \in \Psi_s \cap \Omega_2} H(s)}{|\Psi_s|} \right] \quad (8)$$

式中: $\sum_{s \in \Psi_s \cap \Omega_2} H(s)$ 和 $|\Psi_s|$ 分别表示 Ψ_s 中的结构像素数和总像素数。

Step 6: 选择优先权最大样本块作为当前待修复样本块,重复 Step 3 ~ Step 4,直到 S 为空,结束。

3 纺织文物图样数字化修复方法

在关键技术研究的基础上,结合纺织文物图样数字化修复实践工作,将修复方法整理为如下几个步骤。并绘制方法流程,如图 2 所示。

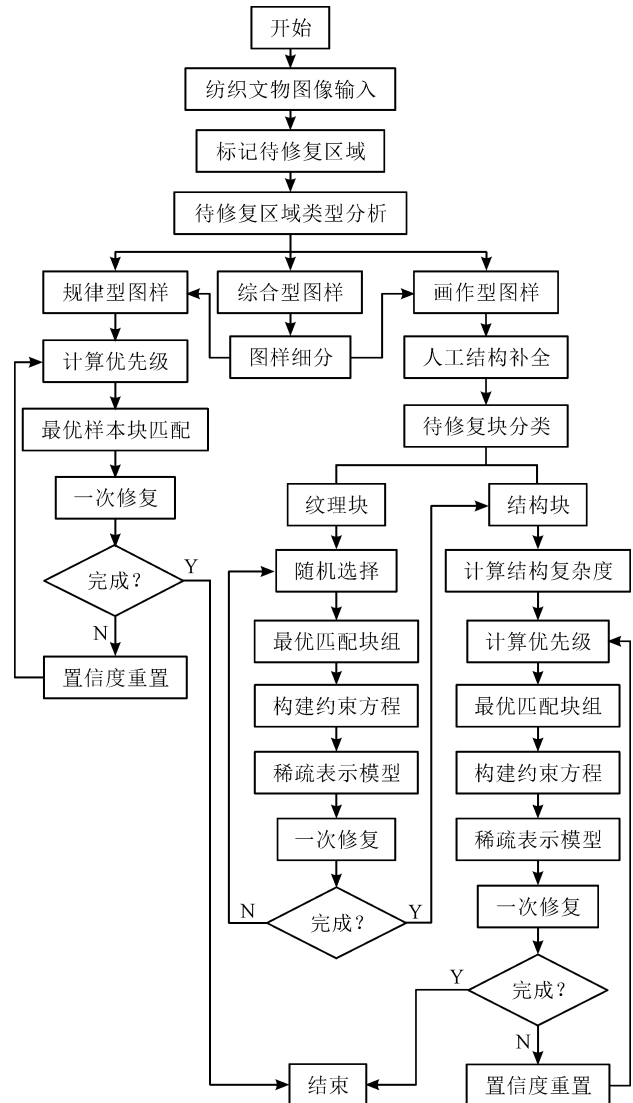


图 2 纺织文物图样数字化修复方法流程

Fig. 2 Flow chart of digital restoration method for textile cultural relics

Step 1: 在人机界面,输入纺织文物图样,并明确待修复区域。

Step 2: 对待修复区域的图样类型进行分析。若为规律型图样,则利用规律型图样数字化修复关键技术进行修复,直到完成修复。

Step 3: 若为画作型图样,则利用画作型图样数字化修复关键技术进行修复,直到完成修复。

Step 4: 若为混合型图样,则需将待修复区域进行分类,再利用 Step 2 和 Step 3 分别进行修复,直到完成修复,结束。

需要补充说明的是,针对混合型图样修复,若操作人员对图样分类分析的能力或经验不足,可直接利用 Step 2 进行图样自动修复。再根据修复效果,

对不满意的区域进行 Step 3 的修复。

4 实例验证

在内存 16G、E3-1230 V5 处理器、CPU 主频 3.4GHz、64 位操作系统的计算机上,对中国丝绸博物馆的唐代大窠宝花纹绫图样进行修复实验。为更直接地观察修复效果,并方便与原始效果进行比较,本文对文物原图样进行三处模拟破损处理。原图样如图 3 所示,模拟破损处理效果如图 4 所示。



图3 文物图样原图样

Fig. 3 Original image of cultural relics



图4 模拟破损处理的文物图样

Fig. 4 Images of cultural relics after damage processing simulation

采用规律型图样修复技术对破损区域进行初步修复,用时 23.6 s,修复结果如图 5 所示。其中破损处 1、3 的修复效果较好,破损处 2 丢失了原图样的结构信息。对破损处 2 进行人工结构补全,并采用画

作型图样修复技术,数字修复用时 474.4 s,修复结果如图 6 所示。



图5 规律型图样修复结果

Fig. 5 Repair results of regular pattern



图6 破损处 2 画作型修复结果

Fig. 6 Repair results of painting type 2 at damage site

针对实验结果,将文中方法、传统人工修复方法和基于 Criminisi 算法的数字化修复方法进行比较,比较结论为:1) 在修复时间上,基于 Criminisi 算法的数字化修复文中方法传统人工修复方法;2) 在修复准确度和修复效果上,基于 Criminisi 算法的数字化修复文中方法传统人工修复方法。综上,本文方法能够较好地满足修复效果要求,且相较于人工修复可以大大缩短修复时间。

5 结论

文物图样的数字化修复方法,相较于传统修复方法,可以显著减少修复时间,提高修复效率。对实验过程进行分析和反思,存在如下几个问题值得进

一步探讨。在今后的工作中,这些问题将会作为算法改进研究的主要内容。

1) 画作型图样的结构修复仍需采用人机交互的形式。结构修复工作需凭借已知区域的图样信息和修复人员的经验进行,具有一定的不确定性。

2) 画作型修复技术与规律型修复技术相比较,具有更高的精确度,但画作型修复技术需要人工参与,修复耗时也相对较多。

3) 包含结构的图样修复结果,在视觉效果上出现了轻微的不连续。

参考文献:

- [1] 马皎,余隋怀. 汉代丝织品纹样的创新设计研究[J]. 丝绸,2018,55(6): 70-75.
MA Jiao, YU Suihui. Research on innovative design of silk pattern in Han dynasty [J]. Journal of Silk, 2018, 55(6): 70-75.
- [2] 苏洁. 中国传统吉祥图案在现代服装设计中的艺术表现[J]. 丝绸,2006(6): 15-17.
SU Jie. Artistic expression of Chinese traditional auspicious patterns in modern fashion design [J]. Journal of Silk, 2006(6): 15-17.
- [3] 王晨. 破损丝绸服饰文物的保护与修复研究[J]. 文物保护与考古科学,2005,17(1): 54-58.
WANG Chen. Research on the protection and restoration of ancient silk clothes [J]. Sciences of Conservation and Archaeology, 2005, 17(1): 54-58.
- [4] CHAN T F, SHEN J. Nontexture inpainting by curvature-driven diffusion [J]. Journal of Communication and Image Representation, 2001, 12(4): 439-449.
- [5] 陈仁喜,李鑫慧,李盛阳. 基于 MRF 的各向异性图像修复模型[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2010,35(10): 1231-1235.
CHEN Renxi, LI Xinhui, LI Shengyang. Anisotropic image inpainting model based on MRF [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2010, 35(10): 1231-1235.
- [6] MASNOU S. Disocclusion: a variational approach using level line [J]. IEEE Trans Image Process, 2002, 11(2): 68-76.
- [7] 郑成松,李琦. 基于改进优先权的对称相似图像修复算法[J]. 信息技术与网络安全,2018,37(12): 14-17.
ZHENG Chengsong, LI Qi. Symmetric similar image completion based on redefined priority [J]. Information Technology and Network Security, 2018, 37(12): 14-17.
- [8] 李丹,仲崇权,王世强,等. 基于全变差和 P-Laplace 模型的混合图像修复算法[J]. 大连理工大学学报,2014,54(6): 676-681.
LI Dan, ZHONG Chongquan, WANG Shiqiang, et al. Hybrid image restoration algorithm based on total variation and P-Laplace models [J]. Journal of Dalian University of Technology, 2014, 54(6): 676-681.
- [9] 李清泉,王欢,邹勤. 一种基于稀疏表示模型的壁画修复算法[J]. 武汉大学学报,2018,43(12): 1847-1853.
LI Qingquan, WANG Huan, ZOU Qin. A mural restoration algorithm based on sparse representation model [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2018, 43(12): 1847-1853.
- [10] BERTALMIO M, VESE L, SAPIRO G, et al. Simultaneous structure and texture image inpainting [J]. IEEE Trans Image Process, 2003, 12(8): 882-889.
- [11] MARIAL J, BACH F, PONECE J, et al. Online learning for matrix factorization and space coding [J]. Journal of Machine Learning Research, 2010, 11: 19-60.